



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DESARROLLO PRELIMINAR DE UN TRANSDUCTOR
FOTOACÚSTICO DE ALTA FRECUENCIA DE NO
CONTACTO

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA ELÉCTRICA – INSTRUMENTACIÓN

P R E S E N T A :

ERIKA ENEDINA MARTÍNEZ MONTEJO



TUTOR:

SANTIAGO JESÚS PÉREZ RUIZ

2011

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Augusto García Valenzuela

Secretario: Dra. Rosalba Castañeda Guzmán

Vocal: Dr. Santiago Jesús Pérez Ruiz

1^{er} Suplente: M. en I. Antonio Pérez López

2^{do} Suplente: Dr. Juan Arnaldo Hernández Cordero

Dependencia y Laboratorios donde se realizó la tesis:

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, Laboratorio de Acústica y Vibraciones, Laboratorio de Fotofísica y Laboratorio de Películas Delgadas. Ciudad Universitaria.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Santiago Jesús Pérez Ruiz

FIRMA

La ciencia son hechos; de la misma manera que las casas están hechas de piedras, la ciencia está hecha de hechos; pero un montón de piedras no es una casa y una colección de hechos no es necesariamente ciencia.

Henri Poincaré (1854-1912)

El científico encuentra su recompensa en lo que Henri Poincaré llama el placer de la comprensión, y no en las posibilidades de aplicación que cualquier descubrimiento pueda conllevar.

Albert Einstein (1879-1955)

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Santiago Jesús Pérez Ruiz y la Dra. Rosalba Castañeda Guzmán por su apoyo, supervisión y guía en la elaboración de este proyecto. Mi agradecimiento a los Drs. Augusto García Valenzuela, Juan Arnaldo Hernández Cordero y al M. en I. Antonio Pérez López por su participación como jurado de esta tesis.

Especialmente a mis padres por su gran apoyo en cada etapa de mi vida, por su comprensión y ayuda.

A todos los miembros del Laboratorio de Acústica y Vibraciones del CCADET así como a mis amigos de generación de maestría.

...Y a mis hermanos de toda la vida, Areli, César y Elías, por siempre preocuparse y motivarme a ser cada día mejor y llegar más lejos.

A CONACyT por la beca otorgada para llevar a cabo mis estudios de maestría.

I. RESUMEN

Se presenta el desarrollo de un prototipo experimental de un arreglo de dos transductores, uno para generar y el otro para detectar ondas ultrasónicas de alta frecuencia en un ancho banda específico. Una de las aplicaciones es la detección de fracturas superficiales en un material utilizado como medio de propagación de la onda generada. La parte generadora se desarrolló depositando franjas micrométricas de Aluminio sobre vidrio (medio de propagación en esta investigación), generando una onda ultrasónica superficial al iluminar los patrones de franjas con un haz láser pulsado con duración temporal de nanosegundos por pulso.

La generación se basa en el hecho de que el vidrio y un patrón de franjas de aluminio depositadas en él, presentan un contraste en sus propiedades de absorción óptica (en la longitud de onda del láser pulsado); en la zona de las franjas de aluminio, se absorbe más energía luminosa, provocando una expansión térmica local, de modo que se tendrá, alternadamente, zonas donde hay expansión térmica y donde no hay; esta diferencia en expansiones genera una onda elástica (efecto foto acústico de haz láser pulsado). El modo de onda generada, dirección y longitud de onda se controlan por las características geométricas del patrón de franjas.

Para registrar la onda generada se hizo incidir un haz láser continuo a un ángulo de 60° sobre otro patrón de franjas del mismo material (aluminio) impreso sobre la muestra. La reflexión de dicho haz se registro en un foto-detector. Las variaciones de la luz reflejada son debido a la vibración del material a la frecuencia de la onda generada.

Las franjas de aluminio se depositaron por el método de sputtering, para lo cual se fabricó una mascarilla en latón con el patrón de franjas necesario, tomando en consideración que la separación entre franjas determina el ancho de banda de la onda generada.

También se desarrolló un modelo matemático a partir del cual se genera un programa de simulación en MATLAB que ayuda a definir características de los dispositivos a usar en el montaje experimental, además que permite tener un pronóstico de la respuesta del sistema.

Las mediciones realizadas para comprobar el funcionamiento del arreglo de sensores, indican que hay un error entre el 1.6% y 10% entre el modelo y el dispositivo experimental.

Esta técnica se considera no destructiva y sin contacto con la muestra, características que ofrecen varias ventajas sobre los métodos que actualmente existen. Se discuten las limitantes encontradas en este desarrollo, sus posibles soluciones y trabajo futuro.

II. ÍNDICE

Desarrollo Preliminar de un Transductor Fotoacústico de Alta Frecuencia de no Contacto

I. RESUMEN	iv
CAPITULO 1	
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVO	2
1.2 ANTECEDENTES	3
1.2.1 GENERACIÓN DE SEÑALES ULTRASÓNICAS.....	3
1.2.1.1 TRANSDUCTORES ELECTROMAGNÉTICOS DE GENERACIÓN DE SEÑALES ULTRASÓNICAS	3
1.2.1.2 TRANSDUCTORES ÓPTICOS DE GENERACIÓN DE SEÑALES ULTRASÓNICAS.....	5
1.2.2 DETECCIÓN DE SEÑALES ULTRASÓNICAS	6
1.2.2.1 TRANSDUCTORES DE ACOPLAMIENTO DE AIRE PARA DETECTAR SEÑALES ULTRASÓNICAS	7
1.2.2.2 TRANSDUCTORES ELECTROMAGNÉTICOS PARA DETECCIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS	7
1.2.2.3 MÉTODOS ÓPTICOS PARA DETECCIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS	9
1.2.2.3.1 MÉTODOS NO INTERFEROMÉTRICOS PARA DETECCIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS	9
1.2.2.3.2 MÉTODOS INTERFEROMÉTRICOS DE DETECCIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS	10
CAPITULO 2	
CONCEPTOS FUNDAMENTALES.....	15
2.1 FOTOACÚSTICA PULSADA	15
2.1.1 MODELO FENOMENOLÓGICO (EXPANSIÓN TÉRMICA DEL MATERIAL MUESTRA)	16
2.1.2 DETECCIÓN.....	20
2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA LUZ LÁSER PARA GENERACIÓN ULTRASÓNICA.....	21
2.3 ONDAS ACÚSTICAS SUPERFICIALES	22
2.3.1 VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA ONDA	23

2.4	TRANSMISIÓN, REFLEXIÓN Y ABSORCIÓN ÓPTICA	24
CAPITULO 3		
	DISEÑO, MODELO Y SIMULACIÓN	28
3.1	METODOLOGÍA	28
3.2	DISEÑO	29
3.3	MODELO Y SIMULACIÓN	31
3.3.1	GENERACIÓN	31
3.3.2	DETECCIÓN.....	35
3.3.3	DIAGRAMAS DE FLUJO PARA LA PROGRAMACIÓN	38
CAPITULO 4		
	DISEÑO EXPERIMENTAL	42
4.1	MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DEL SONIDO EN LA MUESTRA	42
4.2	CONSTRUCCIÓN DEL TRANSDUCTOR.....	43
4.2.1	IMPRESIÓN Y OBTENCIÓN DEL PATRÓN EN PLACA PERFORADA	43
4.2.2	MATERIAL EMPLEADO PARA EL TRANSDUCTOR	45
4.2.3	DEPOSITO DEL PATRÓN SOBRE EL VIDRIO	46
4.3	MONTAJE EXPERIMENTAL.....	47
CAPITULO 5		
	RESULTADOS	50
5.1	FORMATO DE LOS ARCHIVOS.....	50
5.2	MEDICIÓN REALIZADA CON PIEZOELÉCTRICO PVDF.....	50
5.3	RESULTADOS GENERADOS POR EL Sdet.....	51
CAPITULO 6		
	CONCLUSIONES	57
6.1	COMPROBACIÓN Y VENTAJAS DEL MÉTODO	57
6.2	FACTORES CRÍTICOS DEL DISPOSITIVO	58
6.3	LIMITANTES ENCONTRADAS EN EL DESARROLLO DEL TRANSDUCTOR.....	59
6.4	ELECCIÓN DE LONGITUD DE ONDA DE LOS LÁSERES A EMPLEAR	59
6.5	TRABAJO FUTURO	60

APÉNDICE A.	
PROCEDIMIENTO DETALLADO PARA OBTENER LA MASCARILLA IMPRESA SOBRE EL VIDRIO...	61
APÉNDICE B	
ESPECTRO DE ABSORCIÓN Y REFLEXIÓN DE ALGUNOS METALES	64
APÉNDICE C	
PROGRAMAS DE SIMULACIÓN.....	68
III. REFERENCIAS	74

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

En acústica es recurrente la necesidad de determinar cómo se propaga una onda en un medio elástico para mediciones de aplicaciones químicas o caracterización de materiales (medición de espesores, velocidad de movimiento, etc.) [1]. Para ello es necesario excitar el sistema y registrar la onda que se propaga en él con los sensores adecuados.

Las señales ultrasónicas son adecuadas para el estudio de materiales que tienen complicada geometría donde la velocidad de la onda, propagación y atenuación dependen de las propiedades mecánicas del mismo material. Por lo cual con ultrasonido se pueden cuantificar propiedades físicas, mecánicas o estructurales de sólidos y líquidos. Así, los cambios en los parámetros medibles debido a la propagación de una onda ultrasónica a través de un material¹ pueden, en principio, correlacionarse con las propiedades físicas tales como la dureza, módulo elástico, densidad, homogeneidad o estructura. La relación general entre la velocidad del sonido c , su densidad ρ , y sus constantes elásticas σ_{ij} , está dada por la ecuación 0.1.

$$c = \sqrt{\frac{\sigma_{ij}}{\rho}} \quad 0.1$$

Esta ecuación toma distintas formas de acuerdo al tipo de onda (longitudinal o transversal) y la constante elástica utilizada². Los subíndices ij tienen relevancia cuando el comportamiento del material es distinto según sea la dirección de propagación de la onda de ultrasonido en el material, es decir, cuando el material es anisotrópico [2].

Por lo anterior es necesario generar y detectar ondas ultrasónicas. Para detectar se deben elegir los sensores de registro de acuerdo al sistema, con las características correctas de respuesta en frecuencia, sensibilidad e impedancia. Así como el tipo de acoplamiento con el material a caracterizar [3].

¹ Tiempo de tránsito, atenuación, dispersión y contenido de frecuencias.

² Las constantes utilizadas pueden ser Módulo de Young, Constante de Poisson, Módulo de Bulk (de compresibilidad), Constante de Lamé.

La técnica más común en la generación y detección de ultrasonidos hace uso de transductores piezoeléctricos. Los materiales piezoeléctricos generan una diferencia de potencial al someterlos a deformaciones físicas. De la misma manera si se aplica una diferencia de potencial entre sus caras se genera una deformación en el material.

Uno de los principales problemas al hacer uso de estas técnicas ultrasónicas es la necesidad de incorporar un medio de acoplamiento entre la muestra y el transductor para una transmisión efectiva de la señal entre estos dos elementos, por esta razón estas técnicas son conocidas como "de contacto", ya que sin este medio de acoplamiento existen importantes pérdidas de energía que provocan resultados poco satisfactorios.

El uso del acoplador de impedancias también puede provocar errores tales como tiempos de retardo, efectos de carga, cambios en la forma de onda detectada y atenuación debida a la transmisión y reflexión parcial de energía en la capa de acoplamiento [3], [4]. Por ello, la técnica de detección con piezoeléctricos es ineficaz en ciertos casos.

Además existen aplicaciones en las cuales es necesario que no exista contacto entre la muestra y el transductor. Las desventajas mencionadas anteriormente, motivan a buscar alternativas y mejoras a las técnicas de detección y excitación usando equipo remoto, ampliando así la variedad de posibles aplicaciones. Estas técnicas son conocidas como de "no contacto" y permiten obtener una menor modificación de la forma de onda detectada, así como hacer mediciones en ambientes hostiles con altas temperaturas, alta presión y difícil geometría, entre otras ventajas. [3],[5].

Para generar y detectar ondas ultrasónicas se han implementado varios métodos, entre ellos están los electromagnéticos y ópticos, principalmente, con variantes ventajas y desventajas en cada uno de ellos.

1.1 OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es desarrollar un dispositivo que genere ondas ultrasónicas en una banda de alta frecuencia de forma controlada; con esto se pueden caracterizar detectores en esta zona de frecuencia. Al mismo tiempo se desarrollará un dispositivo sensor sin contacto, para detectar las ondas ultrasónicas generadas. El obtener un dispositivo de generación-detección de ondas ultrasónicas permite estudiar diversos transductores basados

en diferentes efectos físicos (electro-magnéticos, ópticos, opto acústicos, electroestáticos, etc.).

El dispositivo que se presenta en este trabajo tiene bajo costo, es de sencillo montaje, de fácil manejo utilizando pocos elementos electrónicos. Todo esto resulta de gran ventaja respecto de los métodos que existen actualmente, ya que, son de complicado montaje y alto costo, o emplean gran cantidad de instrumentación debido a la amplificación y filtrado de la señal detectada.

Debido a que se propone la implementación de un generador y un detector, las posibilidades de aplicación se amplían ya que se pueden utilizar por separado.

Los resultados presentados en este trabajo son preliminares, es decir, de comprobación del método, dejando para trabajo futuro las mejoras que permitan tener resultados más precisos.

1.2 ANTECEDENTES

A continuación se realizará una breve descripción de algunas de las técnicas existentes más frecuentes para generar y detectar señales ultrasónicas sin contacto.

1.2.1 GENERACIÓN DE SEÑALES ULTRASÓNICAS

Como se mencionó anteriormente, existen, principalmente, dos métodos tanto de generación como detección de señales ultrasónicas sin contacto.

1.2.1.1 TRANSDUCTORES ELECTROMAGNÉTICOS DE GENERACIÓN DE SEÑALES ULTRASÓNICAS

En este caso los principales dispositivos son los conocidos como transductores acústicos electromagnéticos³. Su principio de funcionamiento está basado en corrientes Eddy. Se induce una corriente que fluye en la superficie de la muestra por medio de una bobina de varias espiras que se encuentra cerca de la superficie, mientras un solenoide (o magneto permanente) genera en la superficie un campo magnético perpendicular al flujo de la corriente eléctrica alterna, lo que induce a que exista el fenómeno de Fuerza de Lorentz sobre el material de muestra además de corrientes Eddy, de esta manera actúa como una fuente de ondas ultrasónicas como se muestra en la Figura 1.1 [3], [1].

³ EMAT's por sus siglas en ingles. Electromagnetic Acoustic Transducers.

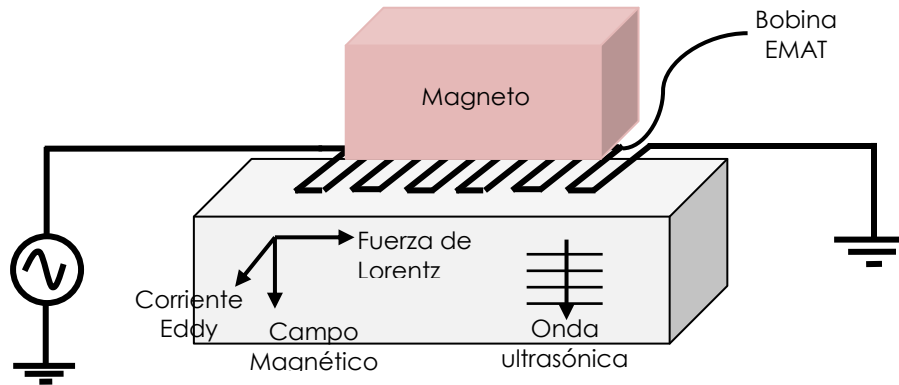


Figura 1.1. Principio de funcionamiento de los EMAT

Una consideración importante en este método, es la configuración de la bobina y la dirección del campo magnético que permite hacer más eficiente la generación y detección de cierto tipo de ondas ultrasonicas. En general, si el campo magnético estático B es normal a la superficie, el EMAT debe tener sensibilidad principalmente a ondas transversales, de igual forma, con B paralelo a la superficie, pueden detectarse las ondas longitudinales.

Una primera aplicación de EMAT's es en la inspección de metales a temperaturas elevadas, por ejemplo, se han tenido registros de temperaturas a 1300°C usando bobinas de molibdeno y tungsteno, también se han detectado vibraciones de ondas transversales en placas a una temperatura de 700°C .

En materiales ferromagnéticos este mecanismo está también acompañado por efectos magnetostrictivos⁴. Hay que mencionar algunas características por las que no es conveniente el uso de este transductor en ciertas aplicaciones; primero, la baja eficiencia es clara y por lo tanto es inevitable el uso de una etapa de pre-amplificación. La eficiencia de operación es también dependiente de la distancia que hay entre la superficie y el EMAT. Típicamente la eficiencia decae como $e^{-\alpha z}$, donde z es la distancia a la superficie y α^{-1} depende del ancho del transductor [7]. Es claro entonces que a pesar de ser un transductor de no contacto, debe estar muy cercano a la muestra, del orden de décimas de milímetro para obtener resultados satisfactorios. Por último, es necesario que el material a excitar o sensar tenga una superficie conductora.

⁴ Es la propiedad de materiales magnéticos que provoca que cambien de forma en presencia de un campo magnético.

1.2.1.2 TRANSDUCTORES ÓPTICOS DE GENERACIÓN DE SEÑALES ULTRASÓNICAS

El principal método es la técnica del pulso láser de alta potencia que genera una onda acústica volumétrica⁵ por calentamiento de la muestra en régimen termoelástico o por ablación del material⁶. En estos casos el ciclo de trabajo es muy pequeño, menor a microsegundos; de esta manera se puede decir que el ancho de la muestra es infinito con respecto al ancho del pulso [8].

En este trabajo nos interesa generar una señal de banda estrecha a fin de tener mayor control sobre la señal a detectar, para ello, en investigaciones previas se han producido arreglos espaciales de fuentes de iluminación de varias maneras incluyendo el uso de arreglos lenticulares, rejillas ópticas de difracción (Figura 1.2a), láseres múltiples, patrones de interferencia, mascarar superficiales periódicas y la más reciente es cubrir ciertas partes del área iluminada disminuyendo de forma importante problemas de alineamientos [5], [9], una forma de hacer esto es mediante una rejilla⁷ entre el láser pulsado y la muestra. Para tener flexibilidad y acceso remoto a la muestra se usa también fibra óptica como se muestra en la Figura 1.2b, con la desventaja de necesitar muy alta potencia óptica para una generación eficiente de ultrasonido.

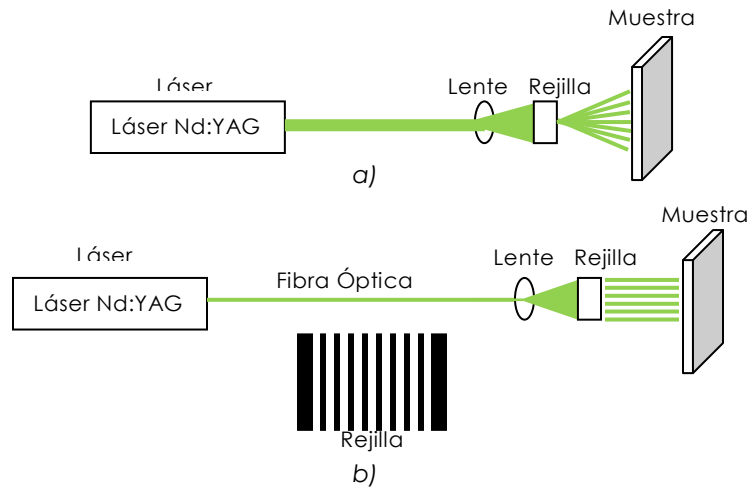


Figura 1.2. a) Generación remota de ondas superficiales de banda estrecha usando rejilla de difracción. b) Con fibra óptica y rejilla.

En el caso de mascarar superficiales o arreglos lenticulares se tiene la desventaja de que las líneas centrales darán mayor potencia de iluminación que las líneas que quedan hacia afuera, esto debido a la distribución de intensidad espacial Gaussiana del haz láser en el modo TEM₀₀.

⁵ Longitudinales y transversales.

⁶ Sin daño a la muestra y con posible daño respectivamente.

⁷ Esta rejilla no es de difracción.

En la generación de ondas acústicas se utilizan arreglos de regiones de iluminación también para mejorar la relación señal a ruido del sistema como podemos observar en la ecuación 1.2.

$$SNR \propto \frac{P}{\Delta F} \quad 1.2$$

Donde P es la potencia de la señal y ΔF es el ancho de banda del sistema de detección. Por consiguiente, un incremento en la amplitud de la señal generada en una banda angosta específica y una reducción apropiada del ancho de banda de detección correspondiente, mejorará la relación señal a ruido y por lo tanto la sensibilidad del sistema.

De acuerdo a los resultados de estudios previos, se observa que iluminando sólo una región de la muestra, es decir, teniendo una sola fuente, el ancho de banda es amplio, mientras que con un arreglo de fuentes (varias áreas iluminadas) se puede obtener una señal de banda estrecha [9].

Stratoudaki [10], propone un diseño basado en una rejilla depositada sobre la muestra a caracterizar, la cual no debe ser necesariamente una superficie conductora o reflejante. Su principio es crear regiones de alto contraste entre regiones ópticas absorbentes y no absorbentes. El espaciamiento entre líneas de la rejilla se selecciona de acuerdo a la longitud de onda del ultrasonido que se desea generar en el material a prueba. Este método resuelve satisfactoriamente el problema de que la superficie deba ser reflejante, ya que la generación se controla de acuerdo al material del depósito de la rejilla.

1.2.2 DETECCIÓN DE SEÑALES ULTRASÓNICAS

Existen actualmente varias técnicas de sensado de ultrasonido sin contacto, las principales son electromagnéticas y ópticas, entre ellas el método capacitivo, EMAT's, holografía óptica y detección interferométrica [4], algunas de ellas se muestran en la

Figura 1.3. En interferometría es necesaria una señal con suficiente amplitud, por lo cual se excita el material cerca del régimen de ablación⁸.

⁸ En el *régimen de ablación* se modifica la superficie irradiada debido a que la densidad de energía es tan alta que ocurre fusión y evaporación. En este régimen las fuerzas generadas son normales a la superficie irradiada y se genera plasma.

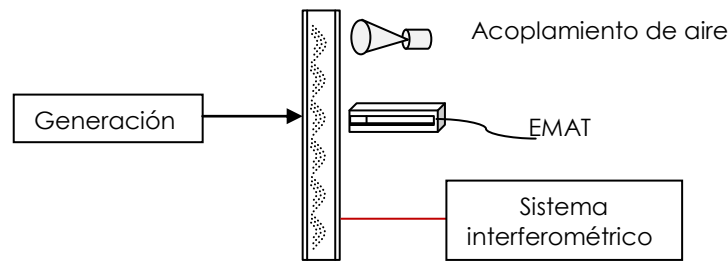


Figura 1.3. Sistemas de detección de ultrasonidos sin contacto

1.2.2.1 TRANSDUCTORES DE ACOPLAMIENTO DE AIRE PARA DETECTAR SEÑALES ULTRASÓNICAS

Existen básicamente dos tipos de estos transductores: capacitivos (o electrostáticos) y piezoeléctricos. El primero de ellos opera como un condensador variable, usando una placa fija rígida y una delgada membrana flexible. Para detectar, la membrana libre se mueve bajo la influencia de una onda ultrasónica. Aplicando un voltaje de corriente directa, se polariza el condensador variable formado por la membrana y la placa rígida, al moverse la membrana se varía la distancia a la placa fija, esto provoca una variación de carga, la cual se detecta haciendo uso de un amplificador con apropiada impedancia en el acoplamiento. Se suelen utilizar membranas con espesores menores a $5\mu\text{m}$ para ampliar el ancho de banda hasta la región de MHz. La respuesta de estos dispositivos es controlada por la separación, diámetro y material de la placa y membrana. [11], [13].

Estos dispositivos han sido diseñados para operar a poco más de 2MHz y se deben colocar muy cerca de la superficie bajo prueba.

Se utilizan también, transductores de propiedades piezoeléctricas, como por ejemplo películas delgadas PVDF corrugadas; sin embargo, su respuesta en frecuencia es del orden de decenas de kHz hasta unidades de MHz con alta potencia a la salida [12].

Ambos tipos de transductores tienen la ventaja de poder ser utilizados para sensar materiales que no necesariamente deben ser conductores, es decir, se pueden sensar polímeros y otros compuestos [11].

1.2.2.2 TRANSDUCTORES ELECTROMAGNÉTICOS PARA DETECCIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS

El principal detector de este tipo fue mencionado también como generador. Los EMATs son operados por corriente y su principio físico es la generación de corrientes Eddy. Consiste en

una bobina conectada a corriente alterna que detecta un campo magnético en el material que se va a investigar, el cual debe ser conductor. Para el modo de detección, el material esta en movimiento ultrasónico a velocidad V interactuando con un imán permanente dando por resultado que exista densidad de flujo magnético. Esto produce corrientes Eddy en la muestra de acuerdo con la fuerza mecánica de Lorentz. Estas corrientes generan un campo magnético perpendicular al generado por la bobina incluso fuera de la superficie de la muestra. Estos campos magnéticos son captados por la bobina, la cual se coloca a menos de un milímetro de la muestra. El voltaje inducido con la bobina resulta de la variación del campo magnético que atraviesa la bobina del EMAT [1]. Una de sus principales ventajas es que pueden generar y sensor modos de vibración complicados [15] además de tener capacidad de respuesta en temperaturas muy elevadas. Detectan ondas longitudinales del orden de picómetros y responden en el rango de decimas de MHz [14].

Sin embargo, debido a su principio de funcionamiento, necesitan un preamplificador de bajo ruido y su calibración es por interferometría. Además son considerados sensores de velocidad, no de desplazamiento, así que para obtener esta variable es necesario procesar en forma diferente la señal detectada.

Otras variantes de sensores de corrientes Eddy, detectan corrosión además de fracturas en materiales conductores así como su conductividad eléctrica y permeabilidad magnética. Algunos investigadores han realizado microsensores bajo este principio con tecnología de películas delgadas donde una espira excitada con una corriente alterna es colocada cerca de la muestra conductora resultando un campo magnético que induce corrientes Eddy provocando otro campo magnético sentido por otra espira, como se muestra en la Figura 1.4 [16]. En los artículos, "Eddy Current Testing Probe Composed of Planar Coils" [17] y "Experimental Determination of Optimum Coil Pitch for a Planar Mesh-Type Micromagnetic Sensor" [18], Yamada Sotoshi propone dos espiras de tipo serpiente planas colocadas una arriba y otra bajo la muestra produciendo así mejor detección de fallas en metales. Si existe fractura en el material, esta causa deformación de la corriente y resulta en un cambio en el campo magnético de la corriente Eddy. Obviamente la distancia entre este sensor y la muestra debe ser muy corta así como el grueso de la muestra, lo cual representa ciertas desventajas en el manejo del método.

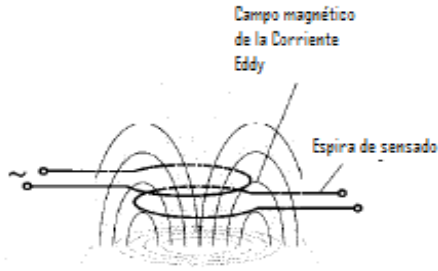


Figura 1.4. Principio de funcionamiento de un sensor de corrientes Eddy.

1.2.2.3 MÉTODOS ÓPTICOS PARA DETECCIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS

Existen dos técnicas ópticas principales para sensar ultrasonido sin contacto, las *interferométricas* y las *no interferométricas*. Estas se describen brevemente a continuación.

1.2.2.3.1 MÉTODOS NO INTERFEROMÉTRICOS PARA DETECCIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS

- *Método de filo de navaja.* Cuando una onda ultrasónica se propaga a lo largo de una superficie, se produce un rizo causando el desvío de un haz láser enviado hacia la superficie, como se muestra en la Figura 1.5. La desviación del rayo se sensa con cualquier detector con una navaja enfrente de este. El tamaño del spot del rayo en la superficie debe ser más pequeño que la distancia entre rizo. La detección mínima reportada es aproximadamente menor a 10^{-2} Å para superficies no absorbentes pulidas, con una detección de ancho de banda de 1MHz y una potencia de láser de 10 mW. La técnica es muy insensible a las vibraciones, pero requiere una superficie pulida y es difícilmente aplicable a superficies rugosas con dispersión de luz. Una de sus aplicaciones es en la detección de fracturas en materiales [19].

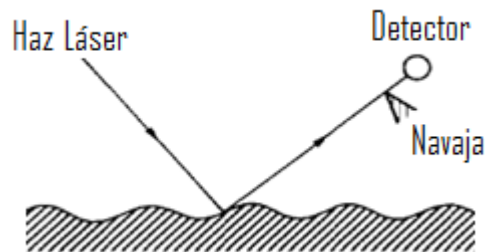


Figura 1.5. Principio de la técnica filo de navaja [19].

- *Método de la rejilla superficial.* Esta técnica ha sido aplicada a la detección de ondas superficiales. A diferencia de la técnica anterior, hace uso de un haz láser de mayor longitud de onda que la de la onda acústica. La rejilla producida por la onda superficial da dos primeros órdenes de difracción del láser, los cuales después de interferir con la reflexión especular de orden cero del rayo, produce un movimiento en

la intensidad [21]. La señal se detecta a través de una rejilla de Ronchi⁹ [23] con adecuado espaciamiento periódico. Esta técnica es altamente limitada a ser de excitación continua en superficies pulidas y limpias.

- *Método de reflectividad.* La propagación de la onda acústica ultrasónica produce pequeños cambios del índice de refracción de la muestra, el cual a su vez causa un cambio pequeño en su reflectividad. Esta técnica; sin embargo, ha sido aplicada exitosamente para detectar ecos ultrasónicos en películas delgadas, dichos ecos son producidos mediante generación láser con ancho de pulso de picosegundos. Debemos también notar que una técnica similar es usada en la detección fototermal, pero el cambio en la reflectividad en este caso es provocada por la temperatura o transporte de concentración de cargas.

1.2.2.3.2 MÉTODOS INTERFEROMÉTRICOS DE DETECCIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS

Los métodos *interferométricos*, consisten en un dispositivo óptico que produce interferencia de ondas de luz generando un patrón con divisiones del orden de la longitud de onda de la luz empleada, que suele ser muy pequeña y por lo tanto resulta adecuada para realizar medidas de precisión, es decir, la información está contenida en la posición, perfil y contraste de las franjas de interferencia. La extrema sensibilidad del patrón de interferencia implica que ciertas partes del montaje deben tener gran precisión [24].

El funcionamiento general de los interferómetros consiste en un rayo que es separado por un divisor, uno de ellos es de referencia y el otro va al objeto que esté vibrando, ambos deben recorrer la misma distancia óptica, este dispositivo mide las variaciones de la luz láser reflejada en la superficie de la muestra que está vibrando, la configuración más simple se muestra en la Figura 1.6. Tales rayos experimentan modulación en fase causada por el desplazamiento de la muestra vibrante o modulación en frecuencia causada por la velocidad. De acuerdo a la aplicación se elige cuál de estas dos formas de sensado puede ser utilizada, esto define también el método de procesamiento de la señal [20].

⁹ Las rejillas de Ronchi consisten en bandas paralelas alternadas transparentes y opacas que actúa como rejilla de absorción.

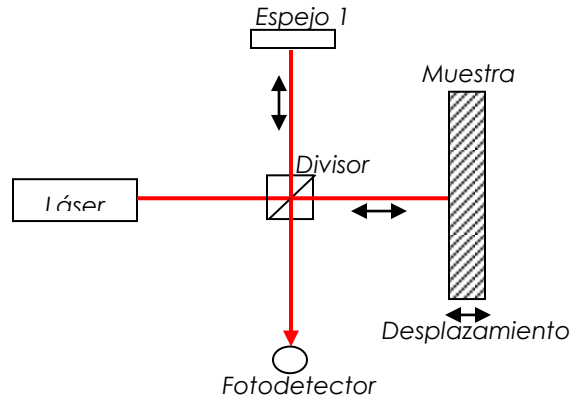


Figura 1.6. Configuración del interferómetro de Michelson

La detección de ultrasonidos por interferometría consiste de típicamente tres pasos consecutivos:

- i) La conversión de ultrasonido a señal óptica
- ii) La conversión óptico-fase (o frecuencia) a intensidad
- iii) La conversión intensidad óptica a señal electrónica.

Estos tres pasos son considerados en el trabajo aquí presentado, procurando hacerlos lo más simples posible.

En los interferómetros es requerido un oscilador óptico local antes de que la señal ultrasónica pueda ser demodulada por medios electrónicos; si tiene la misma frecuencia que el haz láser, el sistema es homodino, si tiene frecuencia ligeramente distinta es heterodino.

En los interferómetros homodinos, la referencia y el haz de señal que viene de la muestra vibrando son recombinados frente a un fotodetector y deben tener ambos la misma intensidad de campo de luz. Sin embargo, estos interferómetros no funcionan bien si no se tiene un buen aislamiento de vibraciones, por lo que es un método de laboratorio.

Los interferómetros heterodinos son la solución al problema anterior; como se mencionó anteriormente, se tiene un cambio de frecuencia en cualquiera de los dos rayos dado por un modulador acústico-óptico con un oscilador local, el modulador es necesario en este interferómetro y tiene la característica de que la muestra actúa como espejo. Aquí la intensidad de los campos de luz no deben ser iguales. En general este es un sensor de desplazamiento [19]. El ancho de banda de interferometría láser heterodina se ha reportado desde 300kHz hasta 35MHz [9]. A continuación se describen los principales ejemplos de estos dos tipos de interferometría.

El *interferómetro de Michelson* es un ejemplo de sistema homodino, éste tiene un funcionamiento muy sencillo, como se puede ver en la Figura 1.6; sin embargo, es extremadamente sensible a vibraciones y cambios de temperatura por lo que puede ser usado solo en laboratorios, éste debido a que es riguroso el factor de distancia óptica mencionado previamente además de una diferencia de fase promedio Φ_0 . También es necesario utilizar frentes de onda planos¹⁰, para lograrlos es necesario tener superficies totalmente pulidas. Todo esto ha motivado a buscar soluciones a dichos problemas a través de nuevas configuraciones; aunque, cada una de ellas ocasiona que la sencillez original se pierda.

Por ejemplo, para solucionar el problema de diferencia de fase promedio constante se cambia la longitud de camino óptico del haz de referencia. Esto se logra mediante un dispositivo electromagnético o material piezoeléctrico que permite un desplazamiento y sobre el cual se puede montar el espejo de referencia (espejo 1 de la Figura 1.6), de tal manera que se mantenga el valor Φ_0 . A este arreglo se le conoce como *compensación electromecánica*, el cual resuelve el problema de estabilización; sin embargo, se mantiene la condición de frentes de onda planos.

Para resolver este detalle, se ha recurrido al *interferómetro de retraso de tiempo*, el cual mide la velocidad de la superficie en movimiento que por efecto Doppler se ve reflejada como un cambio en la frecuencia, haciendo el sistema heterodino. Su arreglo es mostrado en la Figura 1.7. Este sistema no se ve afectado por movimientos a bajas frecuencias ni por el uso de superficies rugosas; sin embargo, debido a las largas distancias de camino óptico que requieren estos sistemas ($L \sim$ mts) no resultan muy prácticos [20].

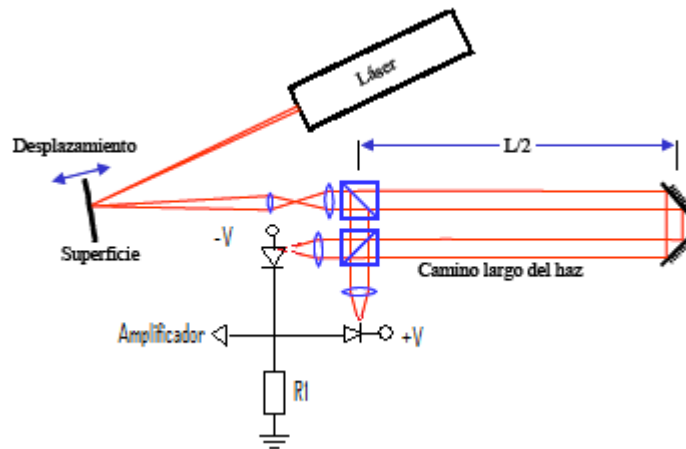


Figura 1.7. Diagrama del interferómetro de retraso de tiempo [3].

¹⁰ Con frecuencia y amplitud constante, normales al vector velocidad de fase.

El *interferómetro de Fabry-Perot* soluciona el problema de emplear grandes longitudes de camino ópticos. Tiene dos espejos esféricos idénticos colocados de tal manera que sus superficies cóncavas estén encontradas y a una distancia d igual a su radio común de curvatura, el cual debe estar entre 5 y 50cm. Este tipo de cavidad¹¹ tiene la propiedad de que el rayo que entra en el punto 3 (referido de la Figura 1.8) regresa al mismo lugar después de 4 reflexiones, repitiéndose el ciclo indefinidamente. Los rayos 1 y 2 pueden ser empleados para transmisión mientras que los 3 y 4 funcionan solo para reflexión.

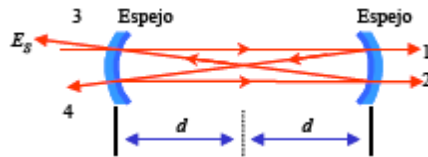


Figura 1.8. Interferómetro confocal Fabry – Perot.

Este interferómetro permite la detección de variaciones de frecuencia (vía el efecto Doppler). Sin embargo, aún se necesita estabilizar el sistema para que tenga una operación óptima, resultando en un sistema heterodino, complicado y costoso como el que se muestra en la Figura 1.9. Es el más usado en la industria aeronáutica.

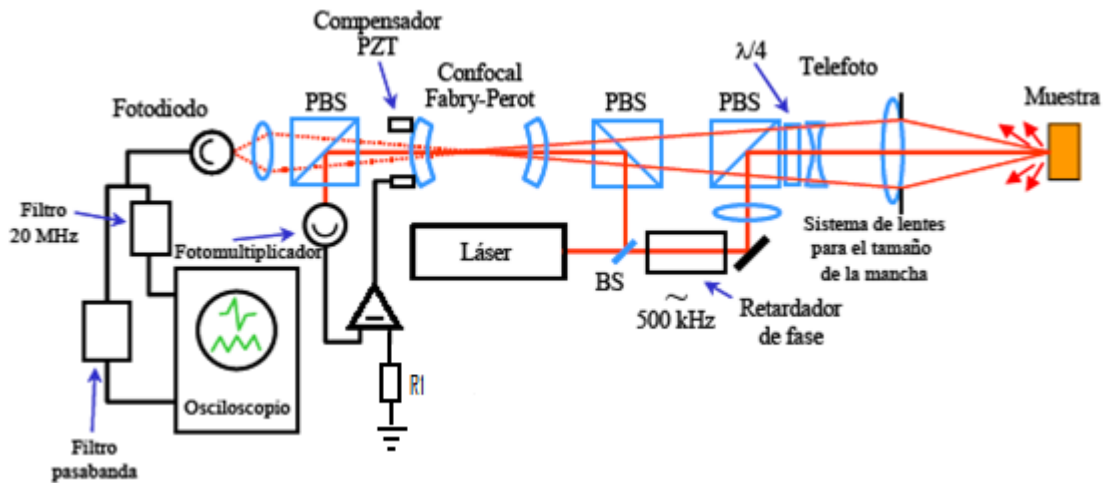


Figura 1.9. Arreglo empleado para medir ultrasonidos mediante el interferómetro Confocal Fabry-Perot.

Otro tipo de interferómetro es el de Mach-Zehnder heterodino, el cual tiene más sensibilidad para detectar movimientos de baja frecuencia, lo que es importante si se trabaja con ondas guiadas. Sin embargo, es muy sensible al tipo de superficie del material. Idealmente, esa superficie tendría que ser un espejo. Como se ha descrito anteriormente, se ha procurado solucionar los problemas del interferómetro de Michelson, dando por resultado sistemas costosos y complicados.

¹¹ CFP. Cofocal de Fabry-Perot.

Sin embargo, la solución está en emplear sistemas *interferométricos adaptivos*. Los interferómetros adaptivos hacen uso de cristales fotorefractivos¹² y pueden ser usados en ambientes industriales ya que son inmunes a cambios de temperatura y vibraciones. Pueden trabajar con speckle¹³ y algunas configuraciones se basan en el efecto de la fuerza electromotriz de estado no-estacionario foto-FEM donde un cristal fotoconductor se emplea como un fotodetector adaptivo [3]; aún así los arreglos no dejan de ser un tanto complicados y aún costosos.

El sistema propuesto en este trabajo, puede ser usado en ambientes industriales y trabaja de orden de decenas de MHz, además de ser de menos costo respecto a los ya analizados y las muestras a caracterizar no necesariamente deben ser pulidas ni reflejantes, lo cual representa una gran ventaja respecto de los sistemas descritos en este capítulo.

¹² PRC por sus siglas en inglés. Photorefractive crystals.

¹³ Patrones producidos por muestras rugosas, dichos patrones son en forma de "manchas" y no en líneas.

CAPITULO 2

CONCEPTOS FUNDAMENTALES

El efecto fotoacústico es actualmente aplicado para la generación de vibraciones sin contacto en materiales, a través de láseres pulsados de alta potencia, produciendo ondas acústicas que se propagan en el material a caracterizar para posteriormente ser detectadas por alguna de las técnicas expuestas en el capítulo 1.

2.1 FOTOACÚSTICA PULSADA

Las espectroscopías fotoacústicas y fototérmicas convencionales, han sido beneficiadas con la utilización de láseres (mayor energía, menor ancho de banda y más direccionalidad) en lugar de lámparas moduladas y filtradas con monocromadores y con el uso de cristales piezoeléctricos en contacto físico con la muestra, reemplazando los micrófonos convencionales utilizados en celdas fotoacústicas abiertas o cerradas. Con esta combinación, la técnica fotoacústica en medios condensados, posee un grado de sensibilidad mayor que cualquier otra alternativa y se optimiza la alta relación señal a ruido propia de la técnica, ya que cuando se utilizan piezoeléctricos PZT en la detección de señales, se visualiza en el osciloscopio ruido aéreo y eléctrico que pueden causar problemas en la medición. El ruido generado es normalmente muy bajo, debido a que se excita con pulsos de energía luminosa muy cortos y se detectan ondas ultrasónicas de alta frecuencia. Debido a estos bajos niveles de ruido es posible evitar blindajes y cuidados adicionales, que son necesarios cuando se trabaja a bajas frecuencias, donde el ruido ambiente generado por vibraciones mecánicas, frecuencia de línea, etcétera, es importante. Además, el empleo de técnicas de detección con buena resolución en tiempo, permiten elegir convenientemente la parte de la señal a estudiar, donde se mejora aún más la relación señal a ruido.

Existen numerosos trabajos que tratan el problema de generación de ondas acústicas en un medio por absorción de luz. En el trabajo de Patel y Tam [21] se puede encontrar una lista de referencias más extensa. Sin embargo, para el caso en que el medio de propagación de la

señal tienen baja absorción óptica y el pulso de excitación es suficientemente corto como para despreciar la difusión térmica, existe un modelo fenomenológico desarrollado por Patel y Tam [8], que sigue aplicándose actualmente pese a su generalidad.

2.1.1 MODELO FENOMENOLÓGICO (EXPANSIÓN TÉRMICA DEL MATERIAL MUESTRA)

Este modelo se aplica a muestras que tienen una absorción óptica baja y el pulso de luz láser de excitación es suficientemente corto temporalmente como para despreciar la difusión térmica¹⁴. El punto de luz láser se considera de diámetro pequeño (enfocado), y homogéneo. El parámetro clave de este análisis es la conversión rápida de la energía absorbida en calor, por medio de procesos de desactivación no radiativos.

En la Figura 2.1 se muestra una representación de la zona excitada por el pulso láser, como un cilindro homogéneo, donde R_s y R_f son los radios de la zona iluminada para un haz láser concentrado y el otro expandido respectivamente.

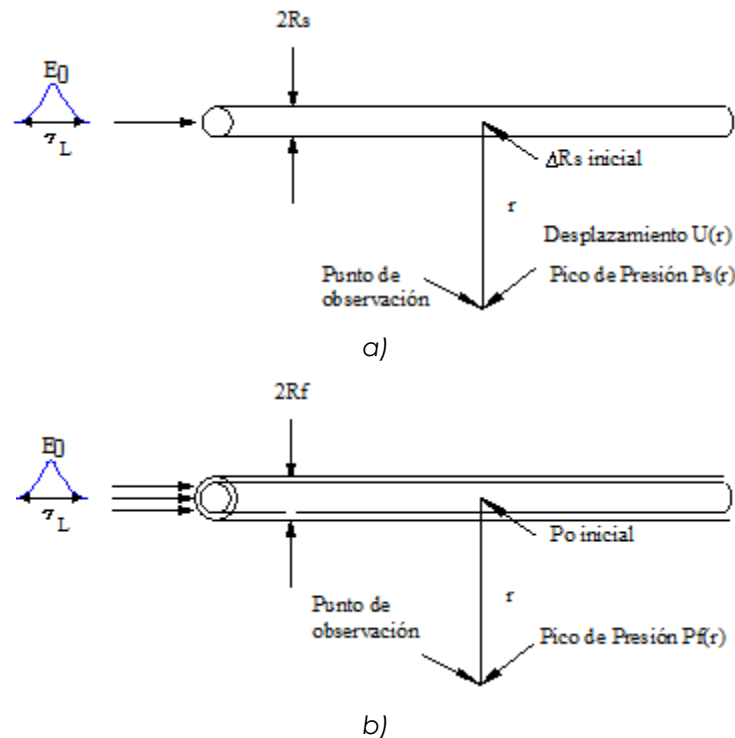


Figura 2.1. Zona excitada por el pulso láser para un medio débilmente absorbente e infinito. a) Radio del haz del láser, $R_s < V_a \tau_L$, b) radio del haz, $R_f > V_a \tau_L$.

¹⁴ Valores altos de esta magnitud indican penetración profunda de la onda térmica.

Sea:

τ_L = ancho temporal del pulso láser	δ = eficiencia de los procesos no radiativos (eficiencia calórica)
E_0 = energía del pulso láser (energía de excitación)	V_a = velocidad del sonido en el medio
r = distancia al punto de observación	$\tau_a = 2Rs/V_a$
τ_{NR} = tiempo de relajación no radiativa	τ_{PZT} = tiempo de respuesta del sensor piezoeléctrico.
τ_a = tiempo que tarda la onda acústica en atravesar el cilindro iluminado	

Consideraciones:

- $\tau_L \gg \tau_{NR}$
- $\tau_L \gg \tau_a$
- $\tau_L \gg \tau_{PZT}$

La energía absorbida por el material depende de la energía incidente y el cambio en la intensidad, esto se expresa en la ecuación

$$E_{abs} = E_0(1 - 10^{-A}) = E_0(1 - e^{-\alpha l}) \quad 2.1$$

Donde:

E_{abs} = Energía absorbida por el material

α = coeficiente de absorción

l = longitud del cilindro iluminado

A = Absorbancia del medio

Para $A \ll 1$

$$E_{abs} = E_0(1 - e^{-\alpha l}) = E_0 \alpha l \quad 2.2$$

La energía de desexcitación térmica estará dada por la ecuación:

$$E_T = \delta E_{abs} = \delta E_0(1 - 10^{-A}) \quad 2.3$$

Para los materiales de estudio, suponemos que la longitud de difusión térmica es despreciable comparada con las dimensiones del punto láser (diámetro de la zona excitada d); es decir, d es mucho mayor a la Difusión térmica. En este caso, el aumento de temperatura ΔT en la zona irradiada puede calcularse en función del calor específico C_p a presión constante de acuerdo a la ecuación:

$$\Delta T = \frac{E_T}{\rho V_1 C_p} \quad 2.4$$

Donde $V_i = \pi R^2 l$ que es el volumen del cilindro iluminado por el láser y ρ = la densidad del medio. Por lo tanto, sustituyendo en la ecuación 2.4 la ecuación 2.3 obtenemos la ecuación:

$$\Delta T = \frac{E_T}{\rho V_i C_p} = \frac{\delta E_0 (1 - 10^{-A})}{\rho V_i C_p} \quad 2.5$$

Si el volumen de excitación se expande adiabáticamente e isobáricamente, entonces, el cambio en el volumen de la región iluminada corresponderá a un incremento en el radio de la zona iluminada ΔR como se muestra en la ecuación siguiente donde V_f es el volumen después de la excitación láser y V_i es el volumen antes de la excitación láser.

$$V_f - V_i = \beta V_i \Delta T \quad 2.6$$

donde β es el coeficiente de expansión volumétrico, V_f es el volumen final y V_i es el volumen inicial.

Sustituyendo las expresiones del volumen en la ecuación 2.6 obtenemos la ecuación 2.7.

$$\pi (R + \Delta R)^2 l - \pi R^2 l = \beta V_i \Delta T \quad 2.7$$

Desarrollando el binomio y sustituyendo V_i como se indico anteriormente y suponiendo que ΔR es mucho menor que R tenemos:

$$\pi (R^2 + 2R\Delta R + \Delta R^2) l - \pi R^2 l = \beta V_i \Delta T \quad 2.8$$

$$2\pi R\Delta R l = \beta \pi R^2 l \Delta T \quad 2.9$$

$$2\pi R\Delta R l - \beta \pi R^2 l \Delta T = 0 \quad 2.10$$

$$l\pi R(2\Delta R - \beta R\Delta T) = 0 \quad 2.11$$

$$\Delta R \approx \frac{1}{2} R \beta \Delta T \quad 2.12$$

Sustituyendo la ecuación 2.5 en la ecuación anterior se obtiene la siguiente expresión:

$$\Delta R \approx \frac{1}{2} R \beta \frac{\delta E_0 (1 - 10^{-A})}{\rho V_i C_p} \quad 2.13$$

$$\Delta R \approx \frac{1}{2} R \beta \frac{\delta E_0 (1 - 10^{-A})}{\rho \pi R^2 l C_p} \quad 2.14$$

$$\Delta R \approx \frac{1}{2} \beta \frac{\delta E_0 (1 - 10^{-A})}{\rho \pi R l C_p} \quad 2.15$$

con $R = V_a r_L$ que es el radio R_s expandido, entonces se puede escribir la relación como:

$$\Delta R = \frac{\beta \delta E_0 (1 - 10^{-A})}{2\pi \rho V_a r_L C_p} \quad 2.16$$

Esta expresión indica la generación de una onda de presión que viaja a la velocidad del sonido del medio V_a radialmente desde el extremo donde llega el pulso láser en el material.

Veamos ahora el desplazamiento ocasionado por esta onda de presión. Si r es la distancia entre el punto de observación y el extremo donde llega el haz y r es mucho menor que l , entonces el desplazamiento de la onda acústica (U_s) en el punto de observación variará como $r^{-1/2}$, por conservación de energía acústica, fenómeno descrito por Landau y Lifshitz. Esto se expresa en la siguiente ecuación.

$$U_s(r) = \Delta R \left(\frac{R}{r}\right)^{1/2} = \frac{\beta \delta E_0 (1 - 10^{-A})}{2\pi \rho l C_p (V_a \tau_L r)^{1/2}} \quad 2.17$$

Y la onda de presión $P_s(r)$, en la posición r , se relaciona con el desplazamiento acústico por la ecuación siguiente.

$$P_s(r) \approx \frac{V_a \rho U_s(r)}{\tau_L} \quad 2.18$$

Sustituyendo 2.17 en 2.18 obtenemos la ecuación:

$$P_s(r) \approx \frac{\beta V_a^{\frac{1}{2}} \delta E_0 (1 - 10^{-A})}{2\pi C_p l (\tau_L)^{3/2} r^{1/2}} \quad 2.19$$

Es importante considerar un caso especial, que consiste en tener absorción débil y haz láser de radio expandido, lo cual significa que el radio final R_f sea mayor que el producto de la velocidad del sonido en el medio por el ancho temporal del pulso láser $V_a \tau_L$. Si el radio de la zona iluminada es grande, entonces el medio no tiene tiempo de expandirse isobáricamente, inmediatamente después del pulso láser, esto produce un incremento de presión P_0 en la superficie del cilindro.

Debido a que el modelo de este fenómeno se basa en comportamientos elásticos del medio de propagación de la onda, P_0 , que es fuerza por unidad de superficie, la Ley de Hook estará dada por la ecuación:

$$P_0 = \frac{\kappa \Delta V}{V} \quad 2.20$$

Donde $\kappa = \rho V_a^2$ es el módulo de elasticidad volumétrico y $\Delta V/V$ es igual a la deformación y a $\beta \Delta T$. Sustituyendo estos valores y la ecuación 2.5 en 2.20 se tiene la ecuación:

$$P_0 = \rho V_a^2 \beta \Delta T = \frac{V_a^2 \beta \delta E_0 (1 - 10^{-A})}{\pi R_f^2 C_p l} \quad 2.21$$

La onda acústica $P_f(r)$ correspondiente a una onda cilíndrica cuya dependencia va como $r^{-1/2}$, por lo tanto haciendo estas consideraciones tendremos la ecuación siguiente.

$$P_f(r) = P_0(R_f / r)^{1/2} = \frac{V_a^2 \beta \delta E_0 (1 - 10^{-A})}{\pi l R_f^{3/2} C_p r^{1/2}} \quad 2.22$$

La ecuación 2.22 es equivalente a $P_s(r)$ de la ecuación 2.19 salvo que el radio efectivo de cilindro $V_{\sigma TL}$ se aproxima al radio del haz expandido R_f . Si la iluminación es fija, algunos parámetros se hacen constantes y podemos reescribir esta expresión como se muestra en la ecuación 2.23 para el rayo concentrado y la ecuación 2.24 para el rayo expandido.

$$P_s(r) = \frac{\kappa' \beta V_a^{1/2} \delta E_0 (1 - 10^{-A})}{C_p} \quad 2.23$$

$$P_f(r) = \frac{\kappa'' \beta V_a^2 \delta E_0 (1 - 10^{-A})}{C_p} \quad 2.24$$

Donde

$$\kappa' = \frac{1}{2\pi l \tau_L^{3/2} r^{1/2}} \quad \text{y} \quad \kappa'' = \frac{1}{\pi l R_f^{3/2} r^{1/2}}$$

Si el medio no cambia o los parámetros del medio no se modifican, entonces:

$$P(r) = \kappa^* \delta E_0 (1 - 10^{-A}) \quad 2.25$$

Donde κ^* depende de κ' ó κ'' y de parámetros térmicos como β y C_p , por lo tanto la podemos definir como en la ecuación:

$$\kappa^* = \kappa' \frac{\beta V_a^{1/2}}{C_p} \quad 2.26$$

2.1.2 DETECCIÓN

Cuando se utilizan piezoeléctricos como detectores, el voltaje que suministra es proporcional a la presión generada por el pulso láser, en donde la señal fotoacústica en términos de los parámetros elásticos tiene la expresión dada por la siguiente ecuación.

$$PA = K \frac{\beta}{C_p \rho} (1 - 10^{-A}) E_0 \quad 2.27$$

Donde K es un parámetro que contiene la información del sensor. En el diseño experimental se tienen controlados varios de los parámetros involucrados, como son la energía de excitación y la constante completa K , por lo tanto es de esperarse que la ecuación 2.27 presente cambios en el factor $(\beta/C_p \rho)$ y los demás parámetros permanezcan prácticamente constantes.

En este trabajo se evita el uso de piezoeléctricos que requieren contacto físico con la muestra por las desventajas mencionadas en el capítulo 1. Razón por la cual se emplean métodos ópticos descritos a detalle en el capítulo 4.

Para la generación sin contacto propuesta en este trabajo, empleamos una rejilla de un material con diferentes propiedades térmicas, como se mencionó anteriormente, pero sin llegar al régimen de ablación [25], este proceso se describe en el capítulo 3.

2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA LUZ LÁSER PARA GENERACIÓN ULTRASÓNICA

Es importante definir las características del láser de acuerdo con la aplicación; en general, es deseable no dañar el material por ablación. Por ello, existen regímenes de potencia en los cuales el calentamiento, producido por el láser en la superficie del material, da lugar a contracciones y expansiones termoelásticas que a su vez actúan como fuentes de ultrasonido propagando la onda en el material, como se muestra en la *Figura 2.2*.

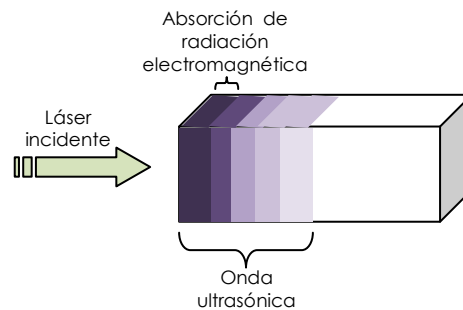


Figura 2.2. Generación de una onda ultrasónica por incidencia de láser.

La mayoría de las veces, el láser actúa sólo como una fuente transitoria de calor, por lo que la elección de la *longitud de onda* no es realmente crítica. El único factor a cuidar es el coeficiente de reflexión de la luz en la superficie de la muestra y como consecuencia, la eficiencia con que la energía se transforma en onda ultrasónica en la muestra.

La *energía del pulso* sí es un factor a cuidar, principalmente porque la amplitud de la onda de ultrasonido, en el régimen lineal termoelástico, es proporcional a dicha energía. Lo que significa que para aumentar la amplitud de la onda generada es necesario aumentar la energía del pulso. Sin embargo, se debe cuidar no dañar la muestra, para evitar esto se puede aumentar el área de irradiación, ya que el umbral de daño depende de la densidad de potencia óptica más que de la energía.

El *área del haz* es importante según la aplicación. Como veremos en el próximo capítulo, para nuestro caso es importante ya que aumenta o disminuye el ancho de banda de la señal generada. Sin embargo, tal factor puede ser modificado por dispositivos ópticos estándar. También es importante que el perfil del haz sea aproximadamente plano (o Gaussiano) para obtener resultados satisfactorios.

La *duración del pulso* influye en el mecanismo de generación, así como en las características de la onda ultrasónica. En "Laser Ultrasonics Techniques Applications", C. B. Scruby y L. E. Drain [29] aclara que la energía óptica debe ser comprimida en un pulso angosto (20 a 30ns) para obtener suficiente potencia instantánea ($>10^5\text{W}$) capaz de generar una onda con amplitud suficiente para ser detectada (del orden de 1nm a 10nm). Además, entre más corta sea la duración del pulso, se pueden generar ondas de vibración ultrasónicas de mayor frecuencia. De esta manera el perfil temporal del láser puede ser descrito como una función delta de dirac [10].

La *tasa de repetición del pulso*, al igual que el área del haz, depende de la aplicación. Por ejemplo, una alta velocidad de repetición ($\approx 1\text{kHz}$) permite incrementar la relación señal a ruido, si el tiempo de medida permite promediar señales. Además, facilita la inspección rápida de un área mayor [3].

2.3 ONDAS ACÚSTICAS SUPERFICIALES

Las ondas analizadas en este trabajo, generadas con la técnica fotoacústica, son ondas acústicas superficiales, también conocidas como ondas de Rayleigh¹⁵. Estas ondas se han aplicado recientemente en la evaluación no destructiva de materiales para su caracterización, ya que sólo se propagan en la capa superior del material e interactúan más fuertemente que las ondas longitudinales o transversales [5]. Una de sus principales características y por la cual toman su nombre, es que su amplitud decae en forma exponencial con la profundidad del material en el cual son generadas, como se muestra en la Figura 2.3. Sin embargo, el control de la profundidad de penetración es posible a través del uso de ultrasonido de banda estrecha, es decir, entre menor contenido de frecuencia tenga la señal, la profundidad de la onda es mayor.

¹⁵ Esto se logra con los mecanismos descritos en los capítulos 3 y 4.

En una superficie con condición de frontera libre (sin soportes), las ondas acústicas superficiales presentan una característica no dispersiva, la velocidad de la onda depende de la densidad y constantes elásticas del material [30].

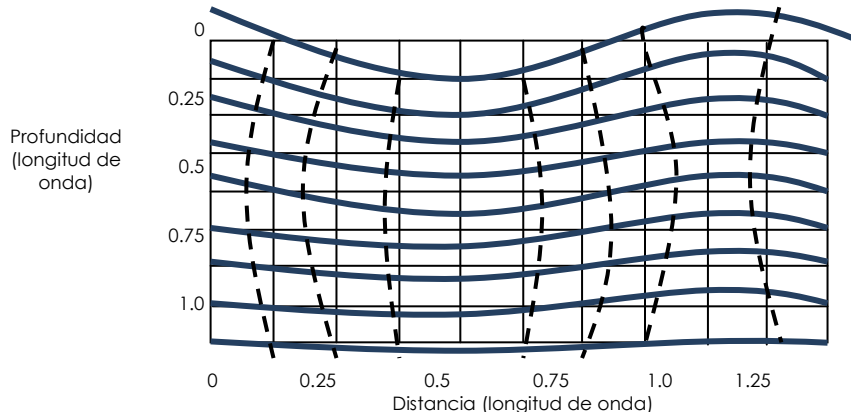


Figura 2.3. Corte en sección transversal de un sólido isotrópico con una onda acústica viajando a lo largo de su superficie.

2.3.1 VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA ONDA

Conocer la velocidad de propagación del sonido en un material representa muchas ventajas, ya que este dato facilita los procedimientos para caracterización de otras magnitudes físicas en materiales como densidad y constantes elásticas.

Para medir esta velocidad existen varios métodos, entre ellos resonancia, propagación de onda y dispersión. Las técnicas basadas en dispersión usan ultrasonido isotérmico de alta frecuencia, obteniendo resultados razonablemente precisos al igual que el método de tiempo de propagación de un pulso y el de frecuencia de resonancia de los modos normales de vibración.

Sin embargo, el método más común es el eco del pulso, este método hace uso de un pulso de ultrasonido muy breve en tiempo generado por un transductor, frecuentemente en contacto directo con la muestra. La propagación del pulso a través del material de interés, se refleja desde el lado opuesto y regresa para generar una señal llamada eco en el mismo transductor, Figura 2.4a. La medición del tiempo que tarda la señal en recorrer la longitud del material permite conocer la velocidad de propagación de la onda.

La técnica fotoacústica también puede ser empleada para este fin, presentando la ventaja mencionada de generación de la señal en la muestra sin contacto directo con ella. Un

método rápido, pero con cierta imprecisión, consiste en enviar un pulso láser a la muestra, donde en su otro extremo se tiene un micrófono de alta sensibilidad que medirá la señal de arriba, como se muestra en la Figura 2.4b. El tiempo que tarda la señal en llegar hasta dicho transductor es el tiempo de propagación de la onda dentro del material, conociendo entonces el largo de la muestra y a través de la relación

$$v = \frac{d}{t} \quad 2.28$$

se conoce la velocidad de propagación de la onda.

Sin embargo, en "Sound speed resolved by photoacoustic technique", Pérez Ruiz S.J., Alcántara Iniesta S., Hernández P.R. y Castañeda Guzmán R. proponen otro método basado en tener dos micrófonos de respuesta exactamente igual, separados por una distancia conocida en la muestra, haciendo incidir el pulso láser en el material, la señal llegará primero a un micrófono y luego al segundo, midiendo la diferencia entre los tiempos de arribo a cada uno de ellos, se aplica de nuevo la relación de velocidad conocida y se obtiene el valor de esta constante, este montaje se muestra en la Figura 2.4c.

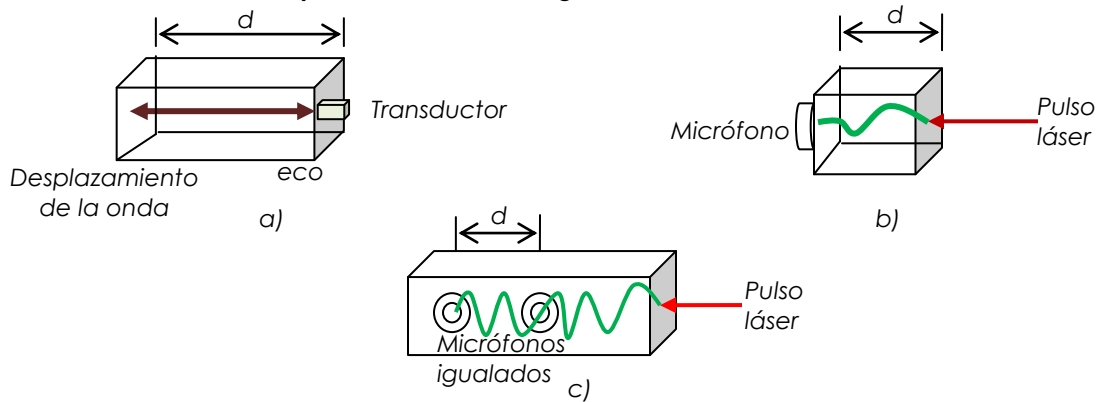


Figura 2.4. Métodos para medir la velocidad de propagación del sonido en un sólido. a) Método del eco, b) Método fotoacústico con un micrófono, c) Método fotoacústico con dos micrófonos igualados.

2.4 TRANSMISIÓN, REFLEXIÓN Y ABSORCIÓN ÓPTICA

En este método, se emplea un láser pulsado para generar vibraciones y otro continuo para detectarlas, se eligen sus longitudes de onda en función de las propiedades ópticas del material a caracterizar y un material a depositar en la muestra, lo cual se explica a detalle en el capítulo 4. Sin embargo este principio es basado en los fenómenos ópticos de transmisión, reflexión y absorción óptica que se explican brevemente a continuación.

El espectro electromagnético comprende un ancho de banda amplio, el cual se muestra en la Figura 2.5. Como se puede observar, el espectro está definido por una magnitud característica que puede ser la longitud de onda (λ) o la frecuencia (f). Donde la relación entre ambas está dada por $\lambda=c/f$, donde c es la velocidad de la luz en el vacío¹⁶.

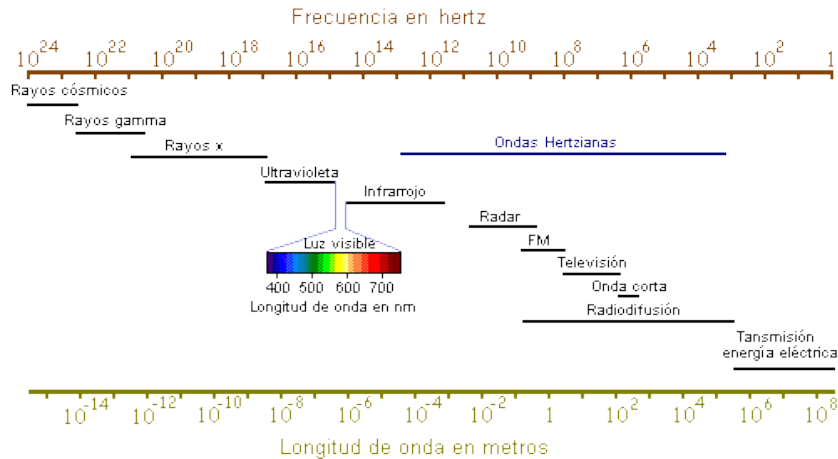


Figura 2.5. Espectro de ondas electromagnéticas.

Cuando la luz encuentra un obstáculo en su camino y choca contra él, pueden ocurrir 3 fenómenos principales. Que una parte de esa luz sea reflejada y si el cuerpo es opaco el resto de la luz será absorbida, en caso contrario una parte será absorbida como en el caso anterior y el resto atravesará el cuerpo transmitiéndose. Por lo tanto, éstas son las 3 posibilidades: *Reflexión, Transmisión – absorción y refracción.*

La Figura 2.6 muestra el caso ideal, donde las componentes de transmisión y reflexión son especulares¹⁷ o perfectamente difusas¹⁸.

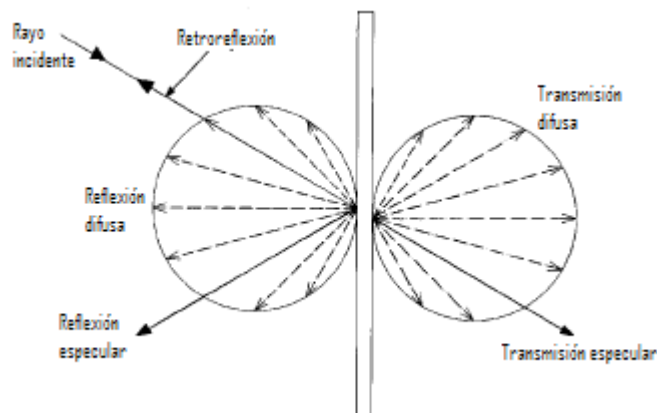


Figura 2.6. Fenómenos ópticos ocurridos cuando un rayo incide sobre una superficie.

¹⁶ $c \approx 3 \times 10^8$ m/s.

¹⁷ Si la reflexión es total, es decir, no existe refracción.

¹⁸ La reflexión es en varias direcciones.

Para cada una de las anteriores se define un coeficiente que nos da el porcentaje correspondiente de respuesta según la longitud de onda. Estos coeficientes son el factor de reflexión (ρ), el de transmisión (τ) y el de absorción (α); ellos cumplen el principio de conservación de la energía, el cual se establece en este caso de acuerdo a la ecuación 0.1 [34].

$$\begin{aligned} \rho + \tau + \alpha &= 1 && \text{para cuerpos transparentes} \\ \rho + \alpha &= 1 && \text{para cuerpos opacos } (\tau=0) \end{aligned} \quad 0.1$$

La *reflexión* es un fenómeno que se produce cuando la luz choca contra la superficie de separación de dos medios diferentes y está regida por la Ley de Snell, la cual establece que si la reflexión es especular, el rayo incidente y el reflejado tendrán el mismo ángulo respecto a la normal a la superficie. La dirección en que sale reflejada la luz viene determinada entonces por el tipo de superficie. Si es una superficie brillante o pulida se produce la reflexión especular en que toda la luz sale en una única dirección. Si la superficie es opaca y la luz sale esparcida en todas direcciones se llama reflexión difusa. Y, por último, está el caso intermedio, reflexión mixta, en que predomina una dirección sobre las demás. Esto se da en superficies metálicas sin pulir, barnices, papel brillante, etc.

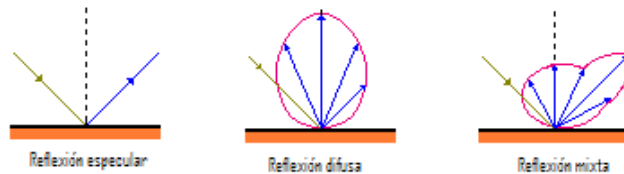


Figura 2.7. Tipos de reflexión de un rayo de luz.

La *transmisión* se puede considerar una doble refracción¹⁹. Si pensamos en un cristal, la luz sufre una primera refracción al pasar del aire al vidrio, sigue su camino y vuelve a refractarse al pasar de nuevo al aire. Si después de este proceso el rayo de luz no es desviado de su trayectoria se dice que la transmisión es regular como pasa en los vidrios transparentes. Si se difunde en todas direcciones tenemos la transmisión difusa y si predomina una dirección sobre las demás tenemos la mixta. Por lo tanto la transmisión se da cuando el rayo pasa de un medio a otro, atraviesa este segundo y vuelve al primero como se observa en la Figura 2.8.

¹⁹ La refracción ocurre cuando el rayo se transmite al otro medio con un cambio en el ángulo del rayo refractado con respecto al de incidencia.

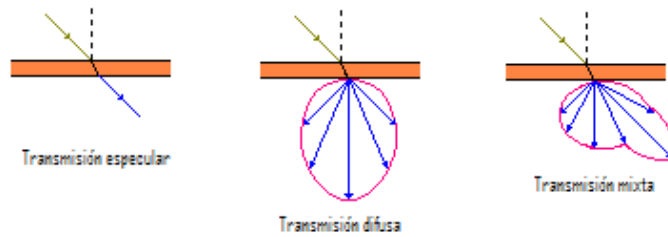


Figura 2.8. Tipos de transmisión de un rayo de luz.

La *absorción* es un proceso muy ligado al color. En él, la radiación es captada por la materia; esta radiación, al ser absorbida, puede ser de nuevo emitida o bien transformarse en otro tipo de energía, como calor. En general, todos los materiales absorben energía en algún intervalo de frecuencias. Aquellos que absorben en todo el espectro de la luz visible son llamados materiales opacos, mientras que si dejan pasar energía en dicho espectro se les llama transparentes [35]. El vidrio ordinario, que fue utilizado como material de muestra del transductor propuesto, es prácticamente opaco a la radiación ultravioleta y transparente a la visible.

CAPITULO 3

DISEÑO, MODELO Y SIMULACIÓN

El diseño de este proyecto depende totalmente de la velocidad de propagación de onda en el material y la frecuencia de la señal que se quiere detectar. Antes de ser montado se realizó un modelado matemático y su programación en MatLab.

3.1 METODOLOGÍA

El transductor propuesto consiste en una parte de generación (Sgen) y otra de detección (Sdet).

El principio físico de funcionamiento de la parte de generación ultrasónica se basa en excitar la muestra con luz láser pulsada (efecto Fotoacústico). La energía del láser es absorbida, trabajando en el régimen termoplástico, calentando localmente la superficie de la muestra ocasionando una expansión rápida a una tasa temporal comparable al tiempo de duración del pulso láser (~10-20 ns), generando así una onda ultrasónica que viaja a la velocidad de sonido característico del material.

El arreglo que utilizamos consiste en iluminar con el láser pulsado todas las líneas de un patrón de generación superficial periódico impreso sobre la muestra. Al ser iluminado, el patrón transmite suficiente energía para provocar expansión térmica local. Este arreglo se comporta como un arreglo de fuentes, con la ventaja adicional de que con un patrón de suficientes líneas la señal generada será de banda angosta.

Un patrón con las mismas dimensiones es impreso para la detección, el material de tal impresión debe ser altamente reflejante a la longitud de onda del láser continuo empleado. Sobre este patrón se hace incidir un láser continuo y su reflejo es sentido por un fotodetector, el cual es conectado directamente a un osciloscopio. El principio es mostrado en la Figura 3.1.

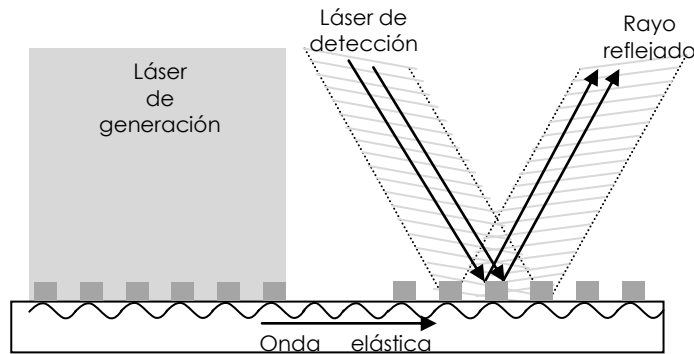


Figura 3.1. Principio de funcionamiento del Transductor Fotoacústico sin Contacto.

Una aplicación posible de este método es la detección de fracturas superficiales, como se mencionó en los objetivos, dicha fractura debe estar localizada entre el patrón de detección y el de generación para poder ser detectada. Si no existen tales fracturas se detectará una señal de la misma frecuencia que la que se generó. En caso contrario la señal detectada tendrá distintas componentes de frecuencia.

Con el fin de encontrar condiciones de diseño, se deriva un modelo para la generación de la señal. Para la detección de esta onda ultrasónica se puede utilizar un esquema óptico sencillo, optimizando la relación señal a ruido de la señal generada.

3.2 DISEÑO

La dirección y longitud de la onda generada son controladas por las características geométricas del patrón impreso en la muestra. La forma del patrón para generar S_{gen} y detectar S_{det} se muestra en la siguiente figura.



Figura 3.2. Mascarilla del S_{gen} .

Las dimensiones del patrón para generar y detectar son exactamente iguales, cada uno con 10 líneas, un largo de 8mm, ancho de $336\mu\text{m}$ que es igual a la separación entre líneas y separación entre S_{gen} y S_{det} de 1cm; se eligieron estas dimensiones debido a que el patrón fue grabado sobre un porta objetos de vidrio que es el material de muestra con dimensiones de 75mm por 25mm. Su geometría es definida según la señal que se quiere generar y detectar,

teniendo conocimiento de la velocidad de propagación de sonido en el material de muestra, como se mencionó anteriormente.

El material de muestra (vidrio sodocálcico, porta objetos de laboratorio), tiene una velocidad de propagación de onda²⁰ de $c=4032\text{m/s}$. Se desea generar una señal de 6MHz . Para realizar el diseño del patrón se parte de la relación dada por la ecuación:

$$c = \lambda \cdot f \quad 3.1$$

Donde c es la velocidad de propagación del sonido en el material, f la frecuencia que deseamos generar y λ su longitud de onda.

El patrón está compuesto por un grupo de líneas donde su ancho es igual a la separación entre las mismas y éstas a su vez son iguales a media longitud de onda. Esto se muestra en la siguiente figura.

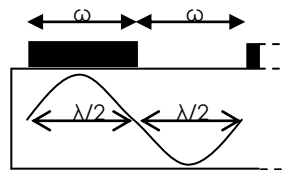


Figura 3.3. Ancho de una línea del patrón, separación entre líneas y comparación con la longitud de onda. Vista lateral de la muestra.

Despejando λ de la ecuación 3.1, se obtiene la relación siguiente:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{4032 \frac{m}{s}}{6 \times 10^6 \text{Hz}} = 672 \times 10^{-6} m \quad 3.2$$

De aquí definimos que el ancho de cada línea del patrón (ω) y la separación entre ellas, que es de $336\mu\text{m}$ equivalente a media longitud de onda de propagación del sonido.

Si deseáramos generar 12MHz , tendríamos que realizar líneas de $168\mu\text{m}$ de ancho y de igual separación entre ellas.

Los detalles de los materiales, construcción e impresión del patrón se describen en el siguiente capítulo.

²⁰ Este dato se obtuvo experimentalmente, esto se describe en el capítulo siguiente.

3.3 MODELO Y SIMULACIÓN

Se presenta adicionalmente el modelo numérico y su implementación en MatLab. El modelo numérico desarrollado, ayuda a definir características específicas de montaje y elementos ópticos.

Recordemos que la parte de generación funciona haciendo incidir un láser pulsado de alta potencia al patrón de generación Sgen, esto genera vibración en la muestra. Dicha vibración es sensada con un láser continuo que se hace incidir sobre el patrón Sdet y su reflejo es la entrada a un fotodetector con el que se obtiene la respuesta de salida.

3.3.1 GENERACIÓN

Para el modelo numérico, consideramos las características temporales de la propagación de la onda acústica en el material como un tren de deltas de Dirac, donde el tiempo que tarda la onda en propagarse entre dos líneas consecutivas es Δtg (este tiempo es también igual al periodo de la onda que queremos generar), como se muestra en la ecuación siguiente.

$$g(t) = \sum_{n=1}^{Ng} \delta(t - n\Delta tg) \quad 3.3$$

Donde Ng es el número de líneas del Sgen. La Transformada de Fourier de esta función es otro tren de deltas con los pulsos en los múltiplos de fg (frecuencia de la señal de generación). El perfil de intensidad del láser de generación se simula con una función gaussiana como muestra la ecuación 3.4, con ancho $Ng\Delta tg$, esto debido a que el rayo deberá iluminar todas las líneas Ng del patrón del Sgen.

$$Pil(t) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t}{Ng\Delta tg} \right)^2} \quad 3.4$$

Estas dos gráficas en función de la frecuencia se muestran en la *Figura 3.4*. Todas las funciones están normalizadas a uno.

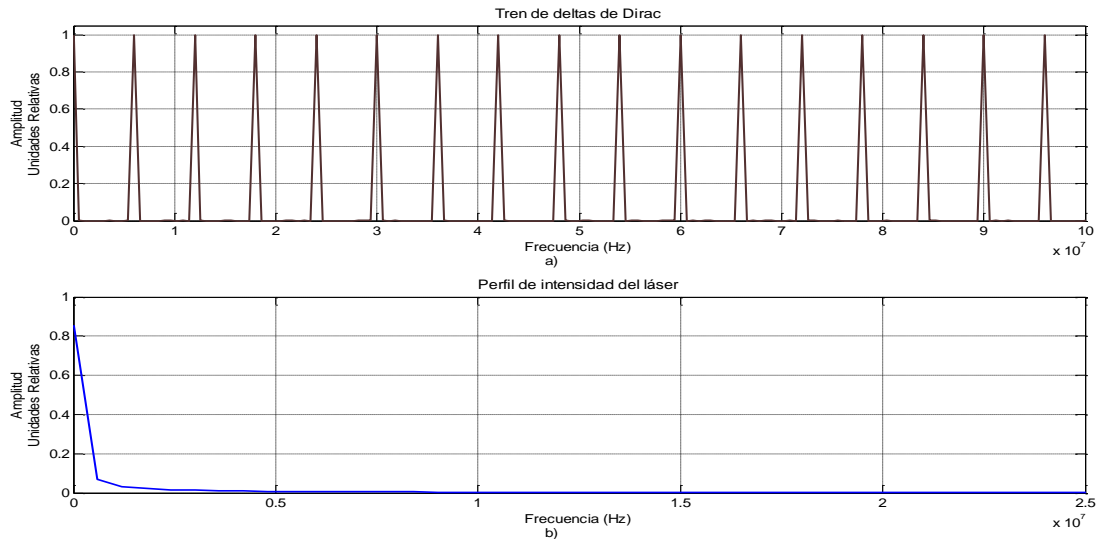


Figura 3.4 a) Peineta de Dirac [característica temporal de propagación], b) Distribución Gaussiana [Perfil de intensidad del rayo láser] para generar 6MHz.

De la multiplicación en frecuencia de estas señales obtenemos una función que llamamos $M_1(f)$ dada por la ecuación 3.5.

$$M_1(f) = G(f)PIL(f) \tag{3.5}$$

Cada línea del Sgen con ancho ω , se modela como un perfil de “sombbrero de copa” que corresponde a una función sinc en el dominio de la frecuencia a la que llamamos $Lg(f)$ y es definida en la ecuación siguiente.

$$Lg(f) = \frac{\sin(\pi \cdot Ng \cdot f \cdot tg)}{\pi \cdot Ng \cdot f \cdot tg} \tag{3.6}$$

Estas señales se muestran en la Figura 3.5.

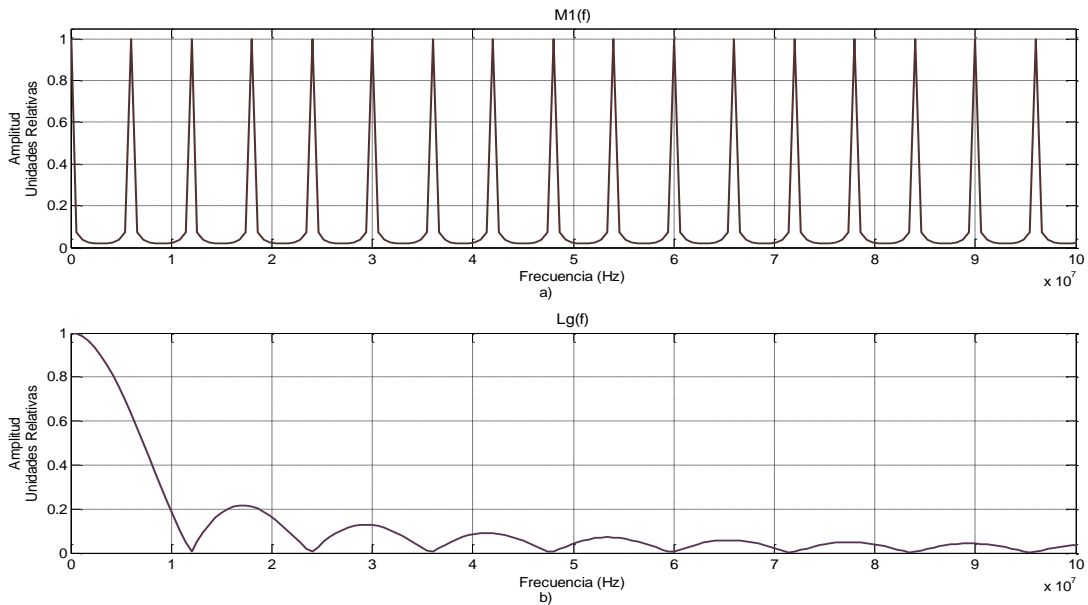


Figura 3.5 a)Funciones $M_1(f)$, b) $Lg(f)$ en frecuencia.

Realizando la multiplicación en frecuencia de $M_1(f)$ y $L_g(f)$, el resultado lo multiplicamos por el perfil temporal del láser de la generación que llamamos $P_{tl}(f)$ y obtenemos la respuesta en frecuencia del sistema de generación $G(f)$. Estas señales se presentan en la Figura 3.6.

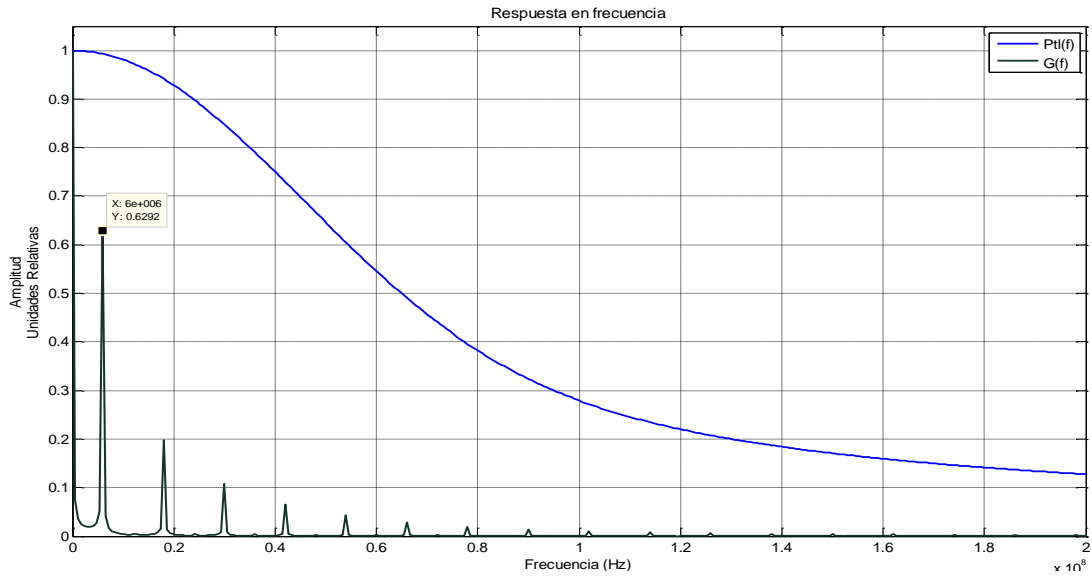


Figura 3.6. Respuesta en frecuencia del sistema Sgen.

Al modelo numérico le introducimos el valor de c y la frecuencia que se desea generar y nos proporciona el ancho de línea del Sgen, que para este caso es de $336\mu\text{m}$ así como las gráficas presentadas anteriormente.

Este modelo numérico nos ayuda a hacer un estimado del número de líneas a usar dependiendo del ancho de banda que deseamos generar, ya que una sola línea tiene ancho de banda amplio, un arreglo de ellas genera entonces un ancho de banda angosto, en general, el ancho de banda es inversamente proporcional al número de líneas N_g iluminadas por el láser. Esto se puede ver claramente en la siguiente figura.

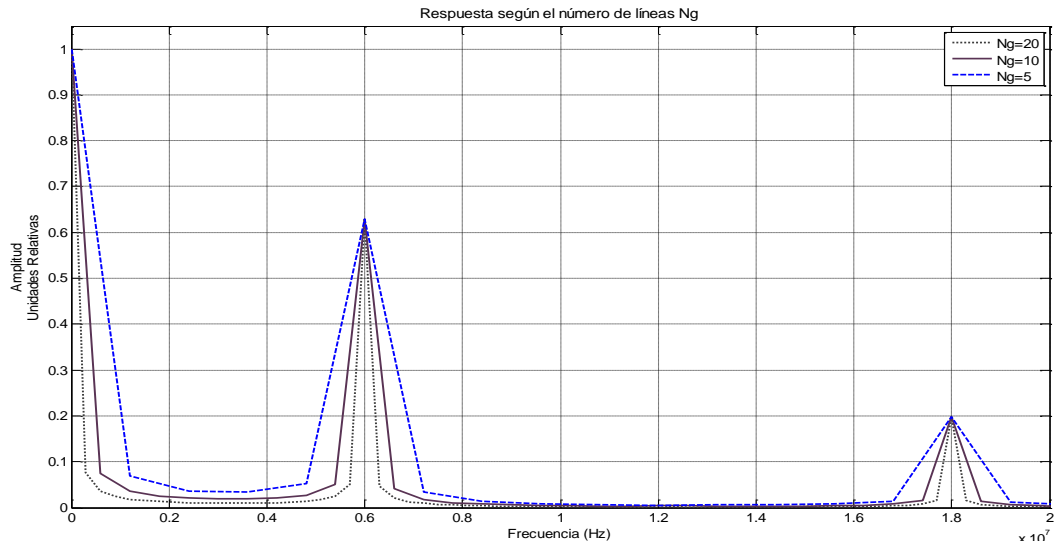


Figura 3.7. Ancho de banda en función de Ng.

También nos ayuda a definir el perfil temporal del láser, es decir, la duración del pulso. Un tiempo muy elevado puede provocar amplitudes de la señal de salida muy pequeñas; por lo que sería necesaria mucha amplificación de la señal de salida. En la Figura 3.8 se muestran 3 distintas respuestas según el perfil temporal del láser, como se puede observar, a mayor perfil temporal del láser es menor la amplitud de la señal generada.

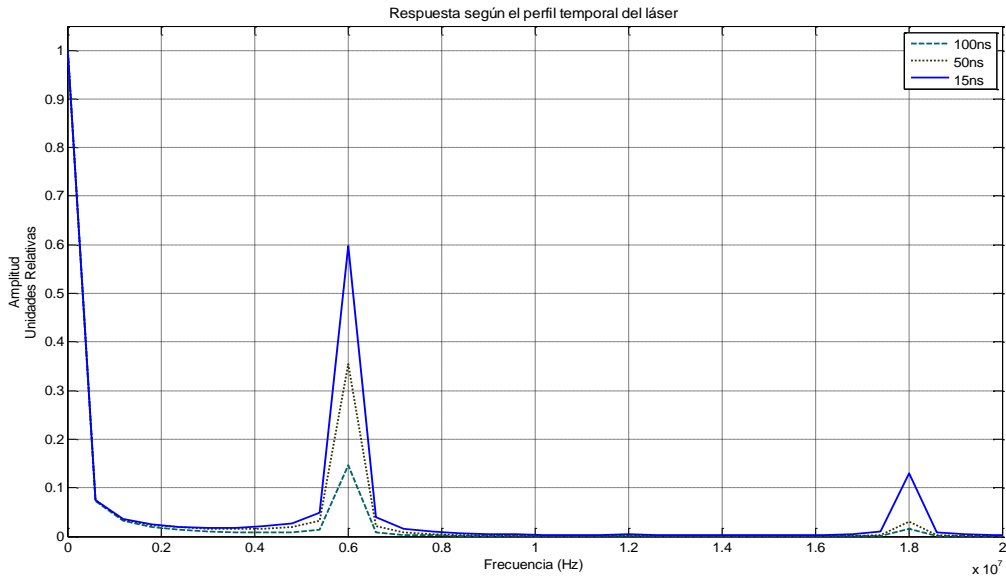


Figura 3.8. Respuesta en frecuencia en función del perfil temporal del láser.

3.3.2 DETECCIÓN

El patrón de detección funciona de una manera muy sencilla, solo detecta el reflejo de un haz láser continuo sobre el patrón impreso en la muestra.

En el artículo "Optical remote measurement of ultrasound", Dewhurst y Q Shan [20] establecen una expresión que generaliza la detección de la vibración de una muestra sólida, por una excitación ultrasónica, mediante la reflexión de un haz láser. Esta expresión se muestra a continuación:

$$E = E_0 e^{i\left(2\pi d + \frac{2\pi}{\lambda} \cos(2\pi f t) + \phi_0\right)} \quad 3.7$$

Donde E_0 es la amplitud del haz láser, d es la amplitud de desplazamiento ultrasónico, λ es la longitud de onda del haz láser, f es frecuencia del desplazamiento ultrasónico y ϕ_0 la fase o ángulo del haz láser sobre la muestra.

En nuestro sistema, debemos considerar en forma importante la altura del patrón impreso sobre la muestra. Ésta altura es la que provoca una modulación en la señal de detección del sistema. Por analogía con la ecuación anterior, describimos la respuesta del sistema en función a la altura del patrón como el promedio de altura de una función escalón, como se indica a continuación [10].

$$e^{2ikg(x)} = \frac{e^{2ik(0)} + e^{2ik(h)}}{2} = \frac{1 + e^{2ik(h)}}{2} \quad 3.8$$

Donde $g(x)$ es la función escalón con 2 alturas importantes, 0 y h ; y el 2 representa el promedio de estas magnitudes.

Con la ecuación 3.8 y 3.7 podemos entonces modelar el sistema de detección mediante la siguiente expresión:

$$S_{det} = e^{i[\theta + A_1 \cos(k_1 x - ct)]} \cdot \frac{1}{2} (1 + e^{2iKh}) \quad 3.9$$

$$S_{det} = \frac{1}{2} [1 + e^{i[\theta + A_1 \cos(k_1 x - ct) + 2iKh]}] \quad 3.10$$

El primer término de esta ecuación corresponde al ángulo de incidencia θ del láser continuo. El segundo, a la onda ultrasónica que viaja en la superficie de la muestra donde A_1 es su amplitud, k_1 su vector de onda y c su velocidad. El tercer término es la contribución de la rejilla o patrón donde K es el vector de onda óptico²¹ y h la altura de la rejilla.

²¹ Este vector tiene magnitud $2\pi/\lambda$, donde $\lambda=633$ nm que es la longitud de onda del haz láser de detección.

Maximizando la ecuación 3.8 mediante cálculo diferencial obtenemos la altura ideal del escalón. Este desarrollo se presenta a continuación.

$$f'(h) = 2jke^{2jkh} \quad 3.11$$

Para igualar a cero esta función y encontrar el punto crítico, utilizamos la parte real de la ecuación de Euler.

$$e^{2jkh} = \cos(2kh) + isen(2kh) \quad 3.12$$

La función coseno es igual a cero cuando el ángulo es múltiplo de $\pi/2$.

$$2kh = \frac{\pi}{2} \quad 3.13$$

Recordemos que k es el vector de onda óptico, cuya magnitud es $2\pi/\lambda$, por lo tanto, despejando h tenemos la altura que proporciona mejor detección de la señal generada y que es una octava parte de la longitud de onda del haz láser de detección:

$$h = \frac{\lambda}{8} \quad 3.14$$

De igual forma que para la generación, se programo la ecuación 3.10 en MatLab para la detección. Los datos de esta simulación son los siguientes:

$\theta=45^\circ$	$c=4032\text{m/s}$
$A1=0.1\text{nm}$	$K=2\pi/\lambda=2\pi/633\text{nm}$
$k_1=2\pi/\lambda$, donde $\lambda=336\mu\text{m}$	$h=130\text{nm}$

La señal de simulación generada por la ecuación 3.10 se muestra en la Figura 3.9a en función del tiempo y la Figura 3.9b es su transformada de Fourier.

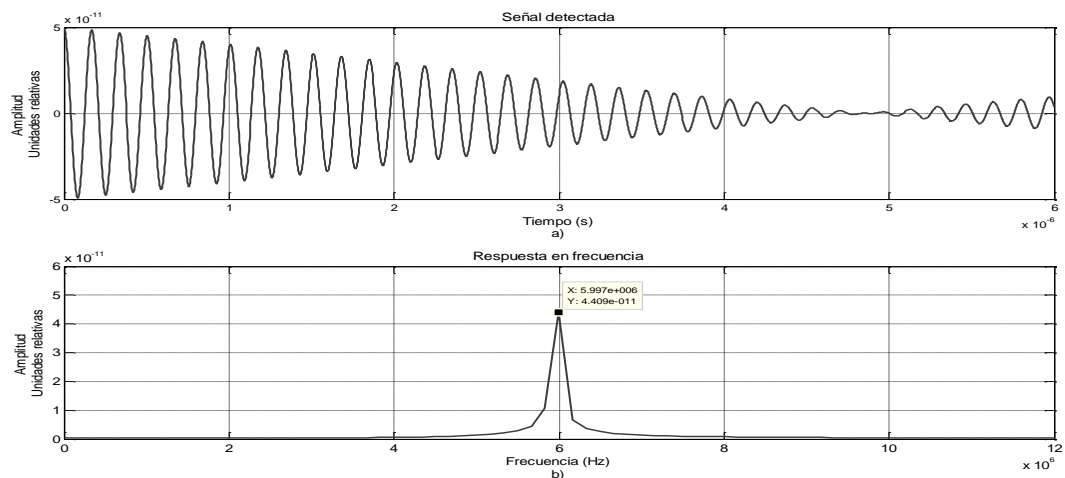


Figura 3.9. Resultado de la simulación del Sdef. a) Respuesta en tiempo, b) Respuesta en frecuencia.

En las figuras 3.10a, Figura 3.10b y Figura 3.10c se muestra la respuesta del sistema con distintos ángulos de incidencia del haz láser de detección; como se observa, lo único que

cambia es el tiempo de modulación de la señal envolvente, pero no la frecuencia de la señal de excitación, que es igual para los tres casos y se muestra en la Figura 3.10c. Así que éste ángulo de incidencia puede elegirse por comodidad en el montaje.

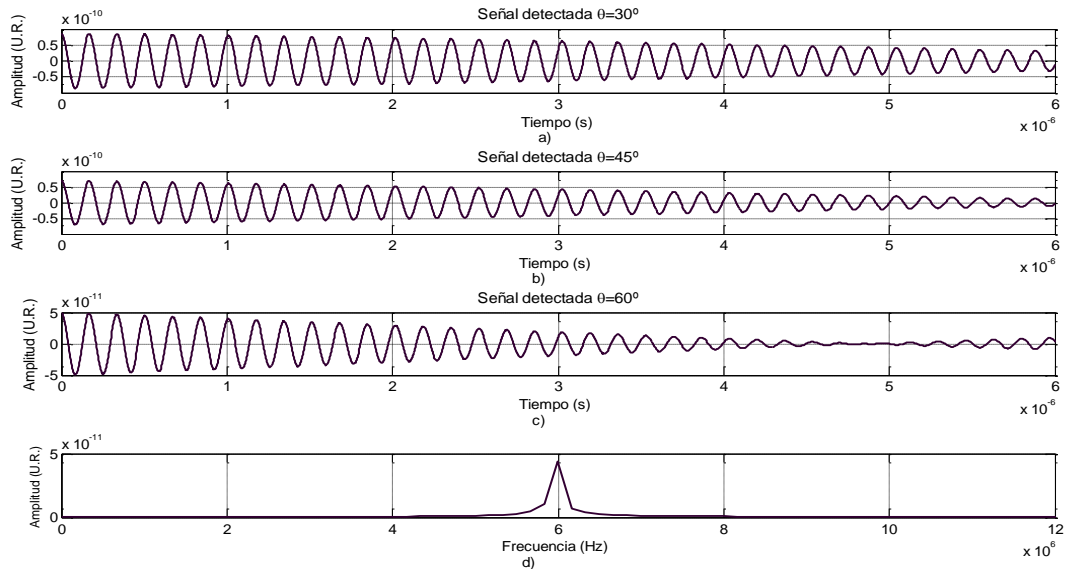


Figura 3.10. Respuesta del sistema con diferentes ángulos de incidencia, d) La respuesta en frecuencia es igual para todos los casos.

El espesor del depósito de material reflejante sí es crítico y depende de la longitud de onda del láser de detección [10], como se mostró anteriormente. Esta altura del escalón h no debe ser mayor a la longitud de onda del láser de detección, ya que si no se cumple esta condición, se elimina la frecuencia central de detección del diseño, como se muestra en la Figura 3.11f, que es el espectro de una señal con $h=2\lambda$; en cambio, los resultados son aceptables si h es menor a este factor, esto se ilustra en la Figura 3.11b y Figura 3.11d. Cumpliendo tal condición se cambia el tiempo de modulación de acuerdo a la altura sin cambiar la frecuencia de respuesta.

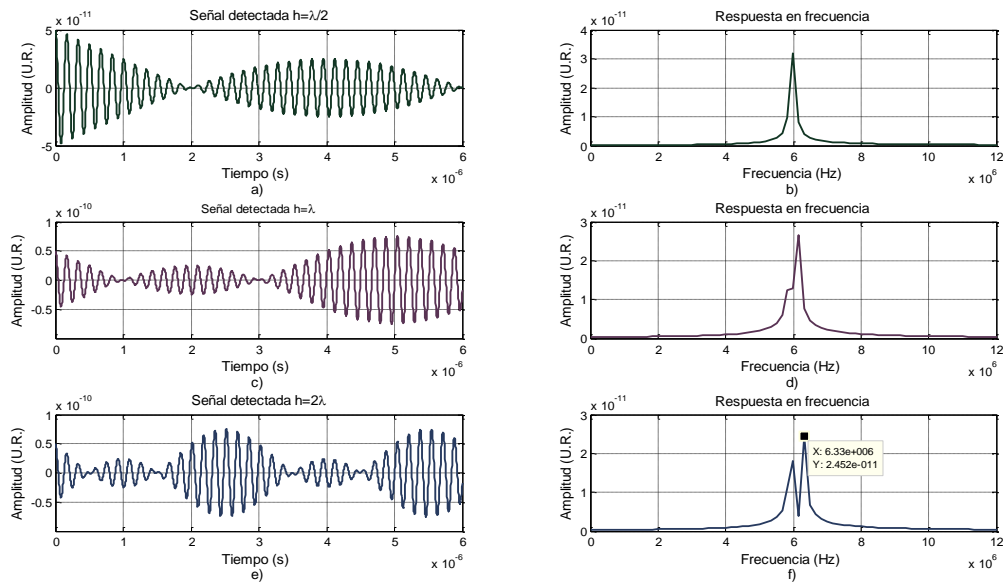


Figura 3.11. Señal de detección según la altura del escalón del depósito.

3.3.3 DIAGRAMAS DE FLUJO PARA LA PROGRAMACIÓN

Como se mencionó anteriormente el modelo numérico se programó en MATLAB, los diagramas de flujo para la programación para la parte de generación se presentan a continuación.

Los datos de inicio para este programa son los siguientes:

- $f_g = 6e6$; Frecuencia de excitación al sistema
- $v = 4032$; Velocidad de onda dentro del material
- $N_g = 10$; número de líneas del TOB
- $DPG = 15e-9$; Duración del pulso del láser de generación

El significado de cada variable se presenta a continuación:

- F_m = frecuencia de muestreo
- T_g = tiempo de duración del pulso láser
- d = ancho de cada línea del patrón

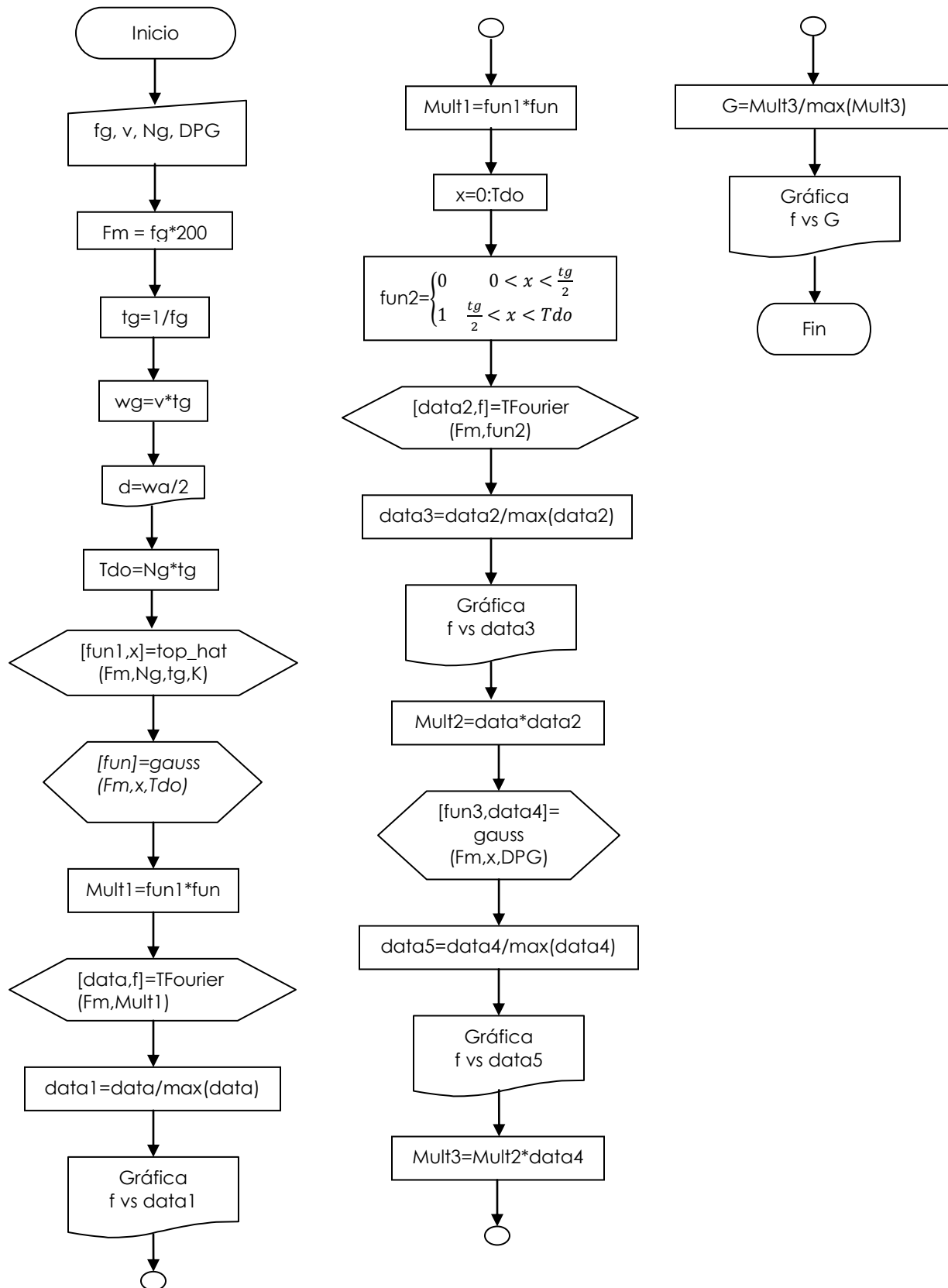


Diagrama 1. Programa principal³⁹
de generación.

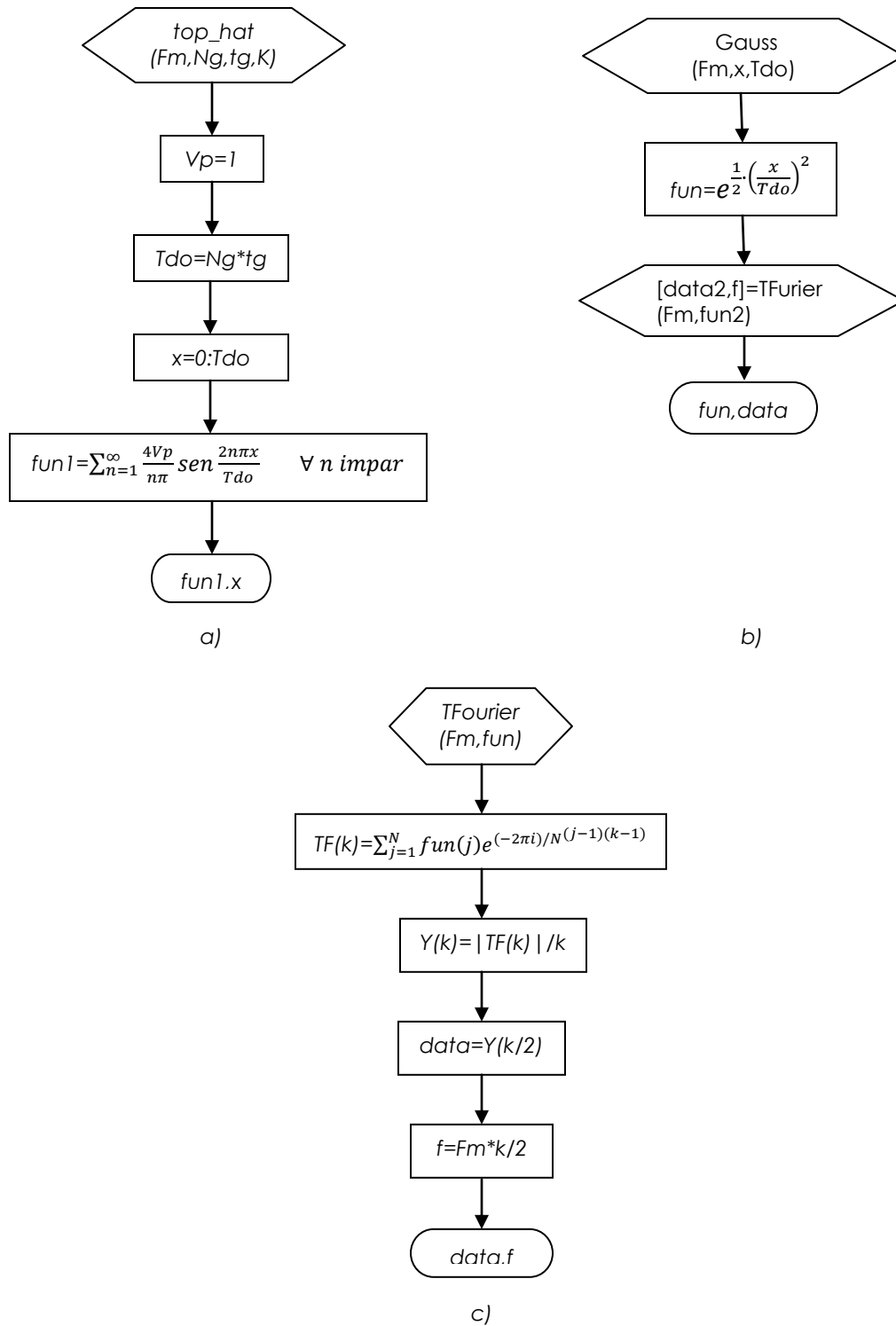


Diagrama 2. Subrutinas para el programa principal generación. a) top_hat. b) Gauss, c) TFourier.

El programa que simula la detección del sistema propuesto se muestra en el Diagrama 3. Los valores y variables se muestran a continuación:

- $\lambda = 633\text{nm}$; longitud de onda del láser de generación.
- $\text{AILG} = 60$; Angulo de incidencia del láser (en grados).
- $A_1 = 1e-10$; Amplitud de la onda superficial.
- $c = 4032$; Velocidad de propagación de la onda.
- $d = 336e-6$; ancho de cada línea del patrón.
- x_1 = vector de espacio.
- t_1 = vector de tiempo.
- $n_a = 317\text{ nm}$; Altura del escalón del depósito.
- $\text{LOAS} = \text{Longitud de onda de la onda superficial}$.
- k_1 = Vector de onda de la onda superficial.
- $\text{AILR} = \text{Angulo de incidencia del láser en radianes}$.
- h = Vector del escalón del depósito.
- K = Vector de onda óptico.

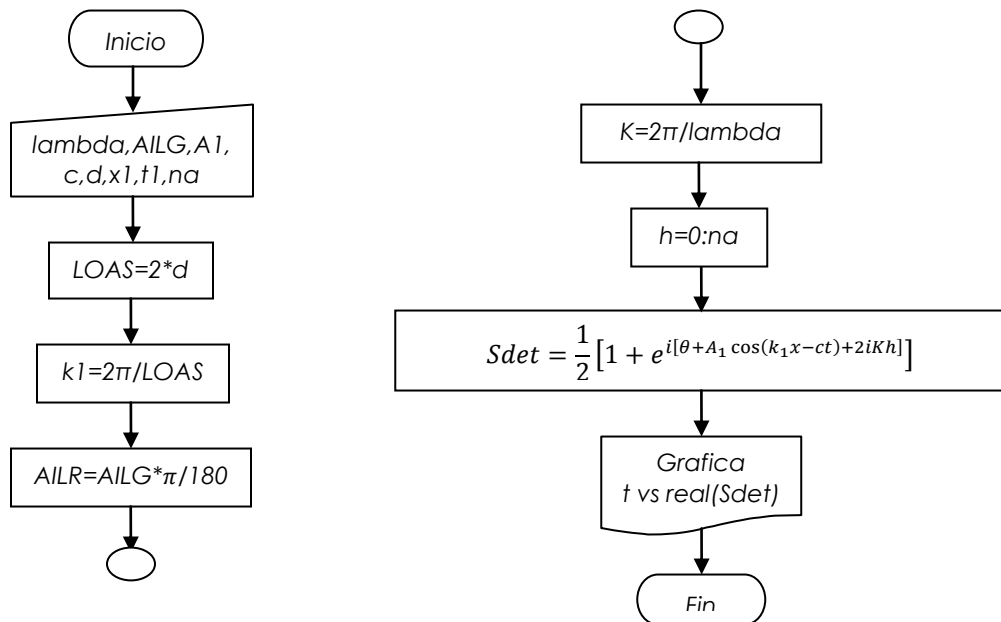


Diagrama 3. Diagrama de flujo que simula la detección del sistema.

CAPITULO 4

DISEÑO EXPERIMENTAL

En este capítulo se dan los detalles sobre el diseño experimental y montaje del transductor.

4.1 MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DEL SONIDO EN LA MUESTRA

Como se mencionó anteriormente, se utilizó como sustrato vidrio común con dimensiones de 2.5cm x 7.5cm x 1mm. Para realizar el diseño era necesario conocer la velocidad de propagación del sonido dentro de este material. Para ello se recurrió a la técnica fotoacústica, irradiando la muestra con un láser pulsado de 355nm de longitud de onda. Se utilizó este láser debido a que el vidrio no es totalmente transparente en este valor del espectro electromagnético, permitiendo que el dispositivo de registro haga una medición correcta.

Se colocó un sensor piezoeléctrico adherido al otro lado de la muestra y se registró la señal en el osciloscopio. El montaje se muestra en la Figura 4.1.

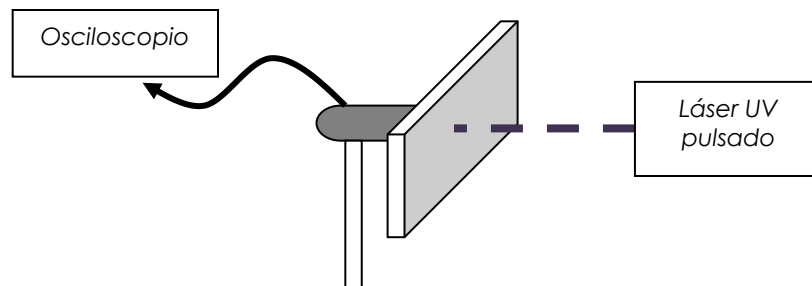


Figura 4.1. Diagrama del montaje empleado para medir c en el vidrio.

El resultado fue un tiempo de arribo de la señal de 248ns. Por lo que c es:

$$c = \frac{d}{t} = \frac{1 \times 10^3 m}{248 \times 10^{-9}} = 4032.25 m/s. \quad 4.1$$

4.2 CONSTRUCCIÓN DEL TRANSDUCTOR

Como se ha mencionado hasta el momento, es necesario imprimir un patrón sobre la muestra de vidrio, para esto, es necesario realizar primero una mascarilla o placa perforada.

A continuación se describe este procedimiento, también descrito en el APÉNDICE A.

4.2.1 IMPRESIÓN Y OBTENCIÓN DEL PATRÓN EN PLACA PERFORADA

Se realizó el patrón con el programa AUTOCAD con las dimensiones reales escaladas, es decir, $336\mu\text{m}$ de espesor de la línea e igual separación entre ellas, una altura de 8mm y espacio entre el Sgen y Sdet de 1cm. Se realizó el diseño del Sgen junto al Sdet, debido a que un arreglo periódico de líneas que actúan como fuentes de ultrasonido, generan ondas superficiales de larga amplitud en la dirección de propagación perpendicular a las líneas [36].

Una máquina de fotolitografía, imprimió el patrón con un haz láser sobre una placa de vidrio sensibilizada, que posteriormente es revelada; este proceso se realizó en el Laboratorio de Películas Delgadas del CCADET.

Con un procedimiento similar, este patrón en vidrio se imprime en una placa cuadrada de latón de 26.6mm de lado y 0.36mm de espesor. Para esto se siguieron los siguientes pasos:

- Se limpia la placa con acetona y posteriormente con alcohol, se enjuaga con agua desionizada, se le realiza un lavado ultrasónico durante 5 minutos y se seca.
- Mediante una bomba de vacío, se sujeta la placa en el disco giratorio de un spin coating. Este proceso se ilustra en la figura 4.2.
- Se coloca una gota de resina positiva sobre el centro del cuadro de latón para que posteriormente el spin coating gire a 800 revoluciones por minuto durante 10 segundos. Una vez que se tiene una cara de la placa con una capa uniforme de resina, se calienta la placa por un periodo de 10 minutos a 90°C .

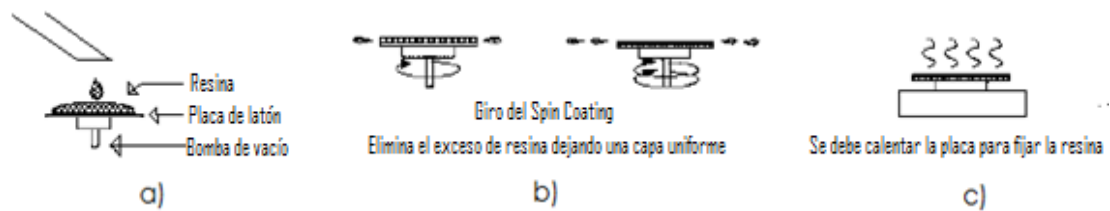


Figura 4.2. Proceso a seguir para obtener una capa de resina uniforme sobre una placa de latón. a) Se coloca una gota de resina sobre la placa, b) se coloca sobre un spin coating, c) Se calienta a 90°C durante 10 minutos.

- Posteriormente se coloca la placa de latón entre dos vidrios haciendo un sándwich, unos de estos vidrios es el que tiene el patrón impreso y es el que se coloca del lado que tiene resina y se sujeta con imanes para evitar que se mueva.
- Se expone a luz UV por un periodo de 12 segundos.
- Se coloca la placa de latón en una solución de NaOH a 1% de concentración por un tiempo aproximado de 5 segundos, con lo cual se tiene el patrón impreso sobre el latón.
- Se calienta de nuevo la placa a 90°C durante 10 minutos.
- El siguiente paso fue perforar la placa de latón; para esto, se coloca la placa en un recipiente con FeCl₃ a 20% de concentración y 50°C por un tiempo aproximado de una hora.

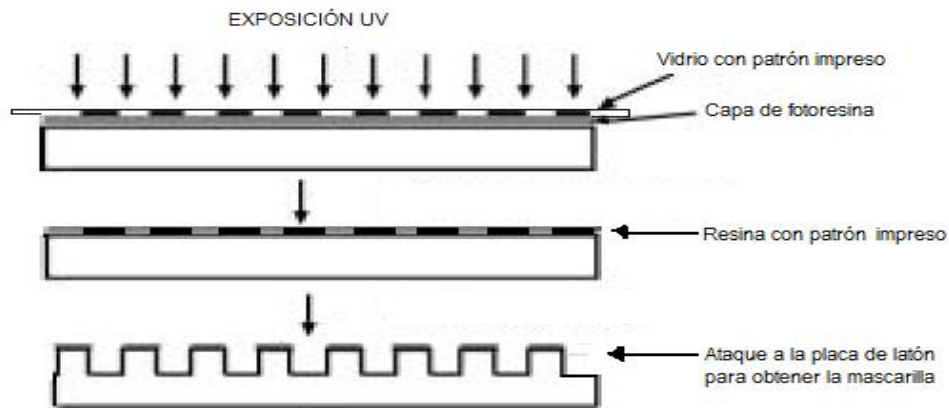


Figura 4.3. Impresión del patrón sobre la placa de latón y ataque.

Las fotografías de la Figura 4.4, muestra una de las mascarillas que se obtuvieron, ya que el procedimiento se realizó para varias placas con la finalidad de poder usar la que tuviera mejor definido el patrón y hacer el depósito sobre el sustrato (vidrio).



Figura 4.4. Placa de latón perforada.

La figura 4.5 muestra el proceso en síntesis paso a paso para obtener esta mascarilla perforada.

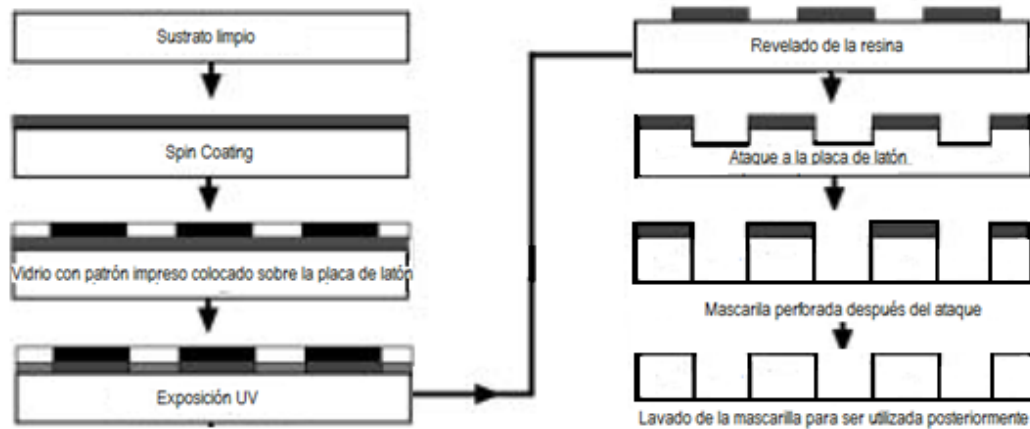


Figura 4.5. Pasos para obtener la mascarilla perforada.

4.2.2 MATERIAL EMPLEADO PARA EL TRANSDUCTOR

El objetivo es crear una fuente ultrasónica con contraste entre las regiones absorbentes (patrón) y no absorbentes (muestra) excitadas con un láser pulsado de alta potencia como se muestra en la Figura 4.6. Incluso si el contraste de absorción entre el patrón y el material de la muestra es de solo 4%, es suficiente para generar ultrasonido detectable [6]. Si se incrementara el contraste de absorción, se mejoraría la eficiencia del generador.

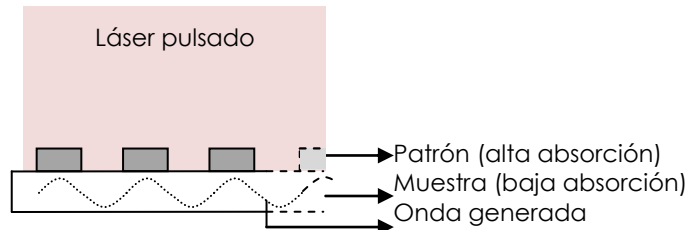


Figura 4.6. Diferencias de absorciones dadas por la muestra y el patrón depositado.

Para detectar la señal ultrasónica, se genera un patrón con las mismas características del Sgen; sin embargo, este patrón debe ser de un material altamente reflejante, ya que se hará incidir un láser continuo con determinado ángulo sobre la muestra y se sensorá el rayo principal reflejado con un fotodetector.

El vidrio es prácticamente transparente a toda longitud de onda del espectro visible, es decir, es muy poco absorbente; por lo tanto necesitamos un material que absorba la longitud de onda del láser con el que excitaremos la muestra para la generación²², en este caso es de 532nm. Para la detección necesitamos un material altamente reflejante para la longitud de onda del láser de detección, el cual para las primeras pruebas es de 633nm (haz color rojo) y posteriormente se realizó la última con un láser de 785nm (haz infrarrojo). En la Tabla 1

²² Rayo color verde.

observamos los valores de absorción y reflexión de algunos materiales a estas longitudes de onda [34].

De acuerdo a la tabla, es claro que el mejor elemento a depositar para generar y detectar es el oro; sin embargo, con este material el costo del proyecto sería muy elevado, en cambio, con cobre o aluminio el costo es mucho menor y se tienen buenos coeficientes tanto de absorción como reflexión. Cabe aclarar que también se puede realizar el depósito de un material para la mascarilla de reflexión y otro material para la de absorción; aunque, este depósito se tendría que hacer en dos etapas, en cambio con un solo material para ambas mascarillas, el depósito se realiza en una sola etapa.

Se eligió el aluminio como material a depositar. Este material cumple apropiadamente para generación y detección y evita hacer un depósito en dos etapas.

MATERIAL	ABSORCIÓN A	REFLEXIÓN A	REFLEXIÓN A
	532nm	633nm	785nm
Aluminio	0.08	0.9	0.88
Cobre	0.3	0.8	0.93
Oro	0.25	0.9	0.97
Hierro	0.38	0.54	0.58
Molibdeno	0.43	0.56	0.54
Níquel	0.4	0.65	0.7
Platino	0.36	0.68	0.7
Plata	0.057	1	1
Tungsteno	0.5	0.53	0.54

Tabla 1. Absorción y reflexión de distintos metales a las longitudes de onda a emplear.

4.2.3 DEPOSITO DEL PATRÓN SOBRE EL VIDRIO

Utilizando las mascarillas de latón, se depositaron películas de Aluminio sobre el vidrio con un sputtering marca LEIKA modelo EM MED020, utilizando una corriente de 8.5 mA, un Voltaje de 4440 V, y una presión de 1.6×10^{-2} MVar, durante 45 minutos.

Se obtuvieron películas uniformes de 130 nm de espesor ($\sim\lambda/4$) con los patrones bien definidos, como se muestra en la Figura 4.7.

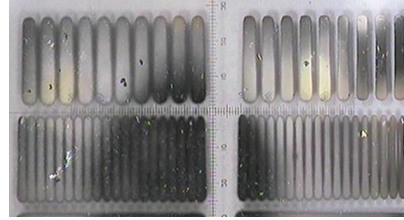
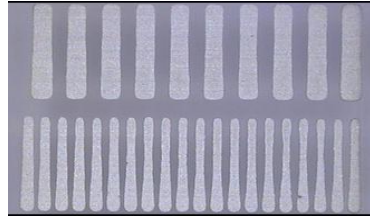


Figura 4.7. Vidrio con el patrón depositado de aluminio.

4.3 MONTAJE EXPERIMENTAL

Se empleó una lente convergente a 30 cm del haz láser pulsado ($\lambda=532\text{nm}$) para concentrarlo y hay también 30 cm de ésta lente a la muestra de vidrio, el rayo expandido cubre el área de todas las líneas del Sgen; este haz de luz tiene forma circular, por lo que se limitó el área de iluminación con una placa perforada de las dimensiones exactas de Sgen, colocada a 2cm del vidrio, como se muestra en la Figura 4.8. De esta manera se ilumina únicamente el patrón Sgen y se evita que el haz de generación interfiera con el patrón de detección.

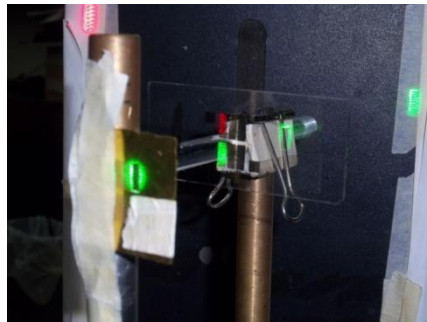


Figura 4.8. Haz láser de generación iluminando el vidrio únicamente en el área del patrón Sgen y haz de detección iluminando únicamente el área del patrón Sdet, verde y rojo respectivamente.

Para la detección, usando el láser continuo de 633nm, se empleó otra lente convergente para concentrar el rayo de reflexión desde el patrón al fotodetector, esto debido a que el láser es de baja potencia óptica (3mW), provocando que sin dicha lente, el osciloscopio no registre señal alguna visible. Sin embargo, se realizó una medición final con el láser continuo de 785nm a 35mW de potencia evitando así el uso de la lente convergente. La salida del fotodetector fue conectado a un Osciloscopio Tektronix 5052B, en el cual se activa un filtro pasa-bajos interno con frecuencia de corte de 20MHz. El ángulo de incidencia del láser de detección fue de 60° para ambos rayos continuos.

El láser de generación es pulsado con 10 Hz de tasa de repetición con duración de pulso de 15ns y energía menor a 10mJ.

El elemento con el cual obtenemos la señal de detección es un fotodiodo MRD500. Para asegurar un buen resultado es necesario conocer su respuesta respecto a la longitud de onda que detecta. El espectro de respuesta de este dispositivo se muestra en la siguiente figura.

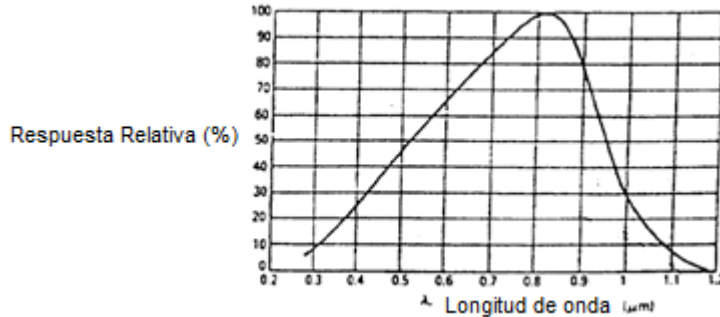


Figura 4.9 Respuesta del fotodetector MRD500 respecto a la longitud de onda [37].

Como podemos observar tiene una respuesta relativa de 70% aproximadamente en 633nm y de 97% en 785nm, que son las longitudes de onda de los láseres de detección empleados.

Además de realizar la medición con el fotodetector, en las primeras mediciones se adhirió una película piezoeléctrica PVDF al vidrio y su señal fue vista también en el osciloscopio. Esta película fue empleada con el fin de comparar los resultados. El límite de la respuesta en frecuencia de esta película es de casi 2GHz, sus dimensiones son 41.1mm de largo por 12.19mm de ancho y 0.23mm de espesor, su masa es de 0.20 gramos; estas especificaciones están disponibles en el manual técnico de sensores piezoeléctricos [38].

El montaje experimental se muestra en el diagrama de la Figura 4.10 y una foto en la Figura 4.11.

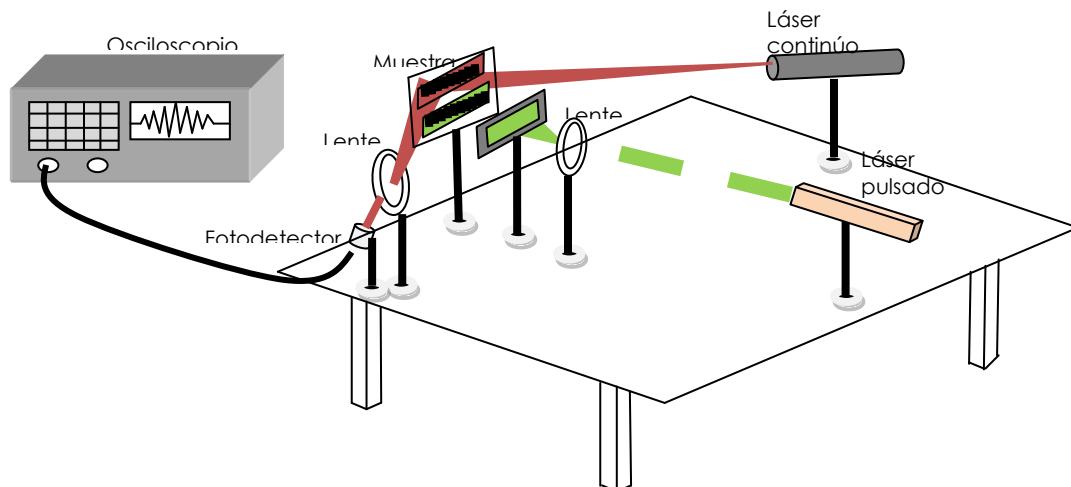


Figura 4.10. Diagrama experimental.

Como se puede observar tanto en el diagrama como en la fotografía, el montaje es sencillo. Además la medición no representa mayor dificultad, incluso las alineaciones son rápidas, el único detalle a cuidar es el área de iluminación del haz reflejado al fotodetector, esto se explica en el siguiente capítulo. Las mediciones se realizan en poco tiempo teniendo el montaje completo. Además no se hizo uso de ningún instrumento de amplificación ni de filtraje. La señal se registró en forma directa con el fotodetector y se midió con el osciloscopio.

Un detalle importante a aclarar, es que por tener señal de alta frecuencia, fue necesario usar cable RG56 para conectar el fotodetector y la película PVDF al osciloscopio. Aun así, estos cables no presentan blindaje total, por lo que pueden ser sensibles a altas frecuencias generadas por otros equipos del laboratorio, incluso por el mismo láser pulsado, provocando cierto ruido en las mediciones.

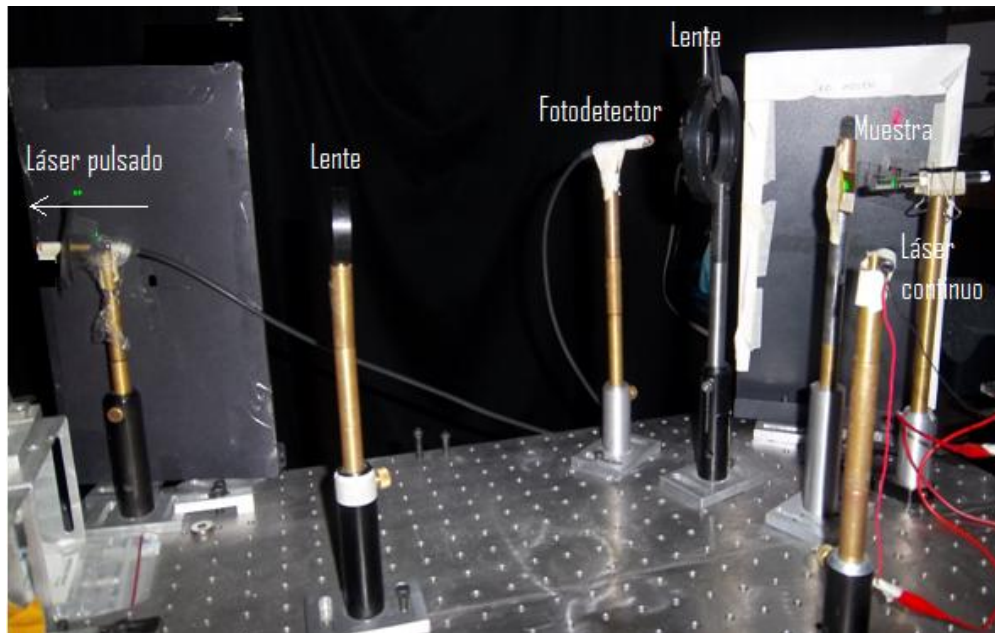


Figura 4.11. Montaje experimental.

CAPITULO 5

RESULTADOS

Se describe a continuación el procesamiento de los datos así como el análisis de los mismos, dificultades encontradas y métodos de solución.

5.1 FORMATO DE LOS ARCHIVOS

Las señales de salida proporcionadas por el fotodetector, fueron registradas en un osciloscopio Tektronix 5052B en formato wfm, para posteriormente ser procesados en el programa MatLab.

Cada señal obtenida se guardó en un archivo después de 400 promedios realizados por el osciloscopio con la finalidad de obtener una señal lo más limpia posible, es decir, eliminando componentes de frecuencia provocadas por ruido aleatorio. La frecuencia de muestreo en todos los casos es de 5GHz con 5000 muestras. Estos dos últimos datos son necesarios para realizar el primer paso del procesamiento, la conversión.

MatLab trabaja con archivos .mat, por lo tanto, se realizó la conversión de wfm a mat utilizando un programa realizado por el Dr. Santiago Jesús Pérez Ruiz. Cabe aclarar que solo se guardan los archivos en escala de tiempo. Una vez convertidos los archivos al formato .mat, se procesaron para obtener su Transformada discreta de Fourier en MatLab y posteriormente analizarlos. Todas las graficas aquí reportadas están normalizadas a 1 de amplitud, ya que en el análisis de los resultados lo que interesa son las componentes de frecuencia, no así las amplitudes.

5.2 MEDICIÓN REALIZADA CON PIEZOELÉCTRICO PVDF

El PVDF (flour polivinílico) es una película delgada de propiedades piezoeléctricas. Este material fue adherido a la muestra y se excitó el sistema con la parte generadora del

transductor, Sgen. La respuesta es posteriormente comparada con las mediciones hechas con el Sdet. Esta medición se realizó sólo en una ocasión, la respuesta medida se muestra en la siguiente figura.

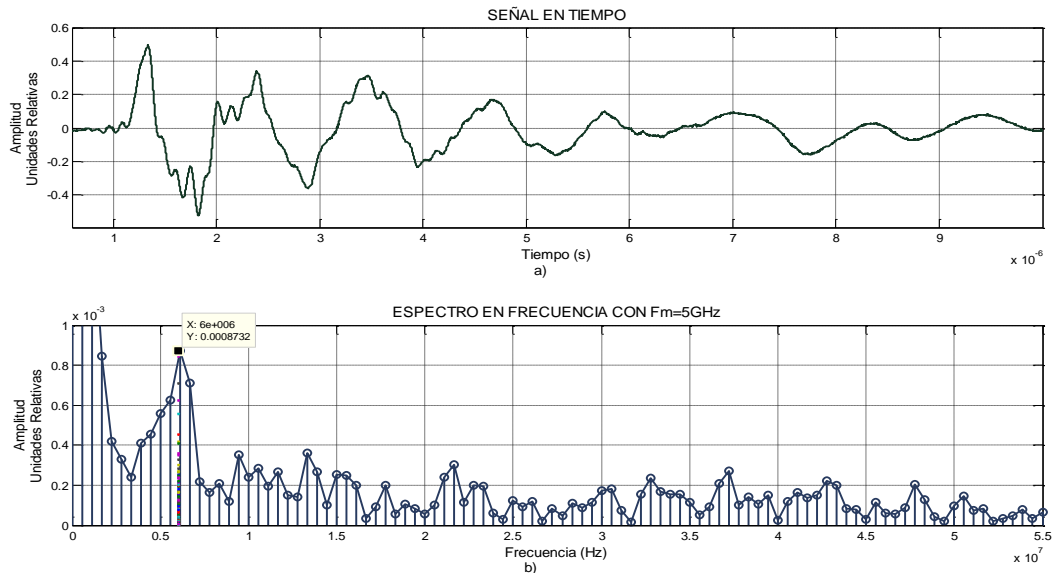


Figura 5.1. Respuesta obtenida con el PVDF excitando el sistema con el Sgen. a) Respuesta en tiempo, b) Espectro en frecuencia.

Como podemos observar, aparece una componente importante de frecuencia en 6.1MHz, muy cercana a la del diseño de generación, que es de 6MHz. Este resultado tiene por lo tanto 1.6% de error.

5.3 RESULTADOS GENERADOS POR EL Sdet

Teniendo seguro que el material vibra a la frecuencia deseada, se conectó el haz láser continuo, realizando las alineaciones necesarias para detectar el rayo reflejado desde el patrón impreso en la muestra. El primer resultado obtenido se presenta en la Figura 5.2.

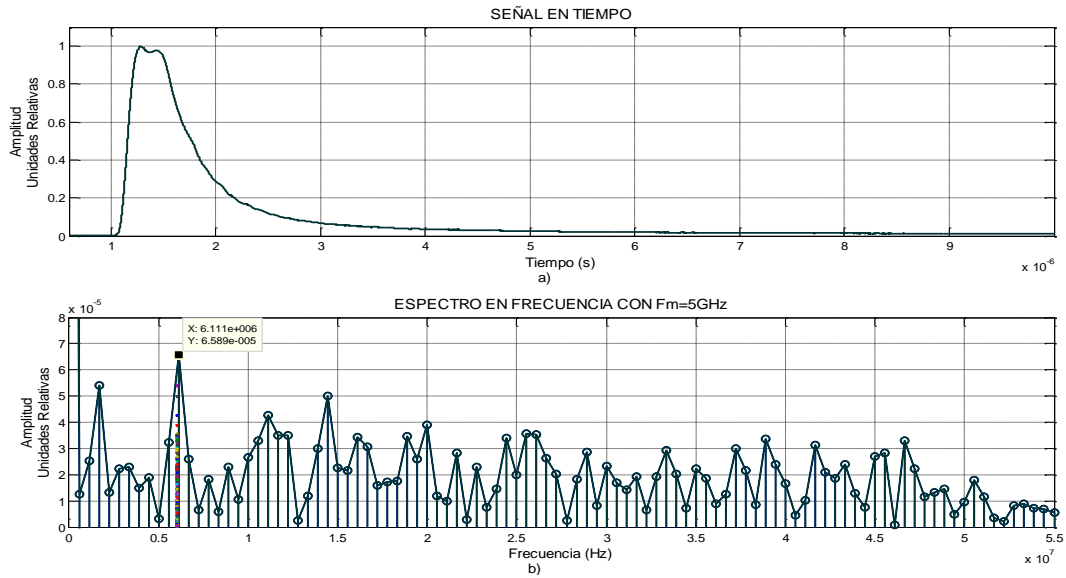


Figura 5.2. Primer resultado obtenido con el Sdet. a) Respuesta en tiempo, b) Espectro en frecuencia.

Como se observa, esta gráfica también tiene una componente importante de 6.11MHz, misma respuesta medida con el PVDF. Es claro que por la forma del espectro es de esperarse por la forma de la señal, un pulso contiene varias componentes en frecuencia.

Sin embargo, esta no es la forma de señal esperada aunque entrega un resultado muy bueno y con mínimo error en la componente principal de frecuencia. El siguiente paso entonces, fue tapar la mitad del área de sensado del fotodetector, de esta manera el dispositivo detecta diferencia de potencia óptica provocando oscilaciones vistas en el osciloscopio, ya que si los cambios en el haz de luz ocurren totalmente dentro del área lente del fotodetector, éste no registra cambios en la señal, es decir, deben haber variaciones dentro y fuera del lente; esto también se podría mejorar con un fotodetector de menor área de detección [39]. El nuevo resultado se muestra en la Figura 5.3.

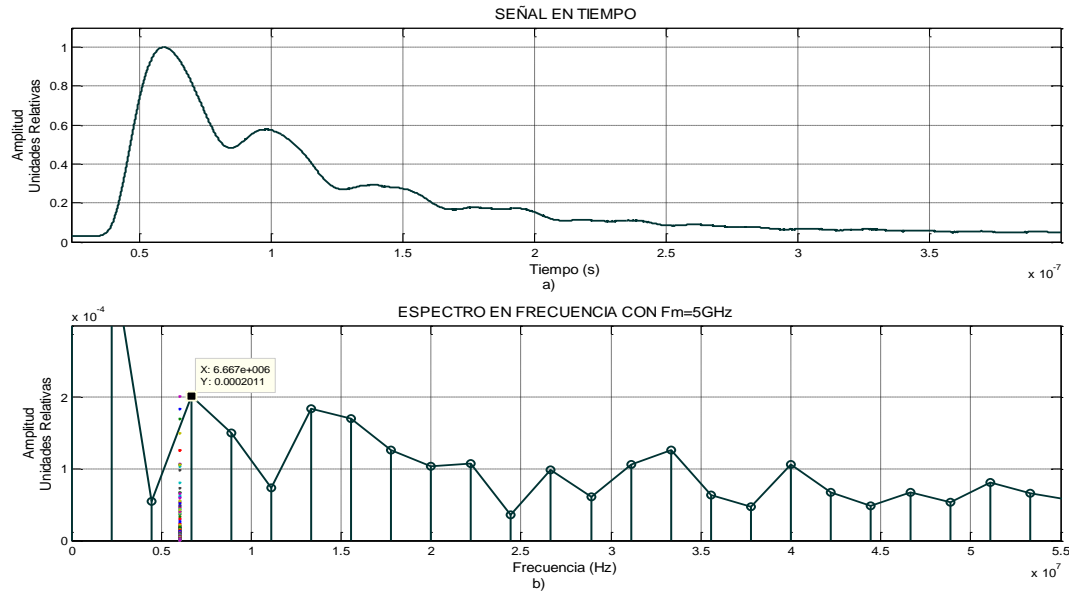


Figura 5.3. Señal detectada después de tapar la mitad del lente del fotodetector. a) Respuesta en tiempo, b) Espectro en frecuencia.

Este resultado aún muestra la señal montada sobre un pulso e incluso un corrimiento de la componente principal de frecuencia a 6.66MHz, lo que representa un error de 10% respecto de la señal deseada. Se observó que dicho pulso podría ser del láser de generación, ya que la lente que concentra el rayo de reflexión del Sdet, alcanza a concentrar también luz dispersa del láser pulsado al momento de chocar con la muestra, esto sucede fácilmente por que el depósito del Sgen también es aluminio y el fenómeno de dispersión ocurre con facilidad. Al concentrar parte del haz de generación, el pulso del mismo es evidente en la señal detectada.

Por esta razón, se intentó aislar el camino óptico de la reflexión del láser continuo a la lente, evitando lo más posible incidencia en ella de los rayos dispersos provenientes del Sgen, la señal detectada se muestra en la Figura 5.4. El resultado es una menor amplitud en el pulso de la señal, pero también mayor amplitud en las componentes de la señal de detección. La señal aun se monta sobre el pulso por que existe un rayo de dispersión que tiene exactamente el mismo ángulo de incidencia sobre la lente que el rayo reflejado, esto se observó cuando al apagar el haz de detección, sobre el fotodetector incide directamente un rayo del haz de generación concentrado por la lente como se explico anteriormente; además de que el láser verde tiene mucha mayor potencia que el rojo.

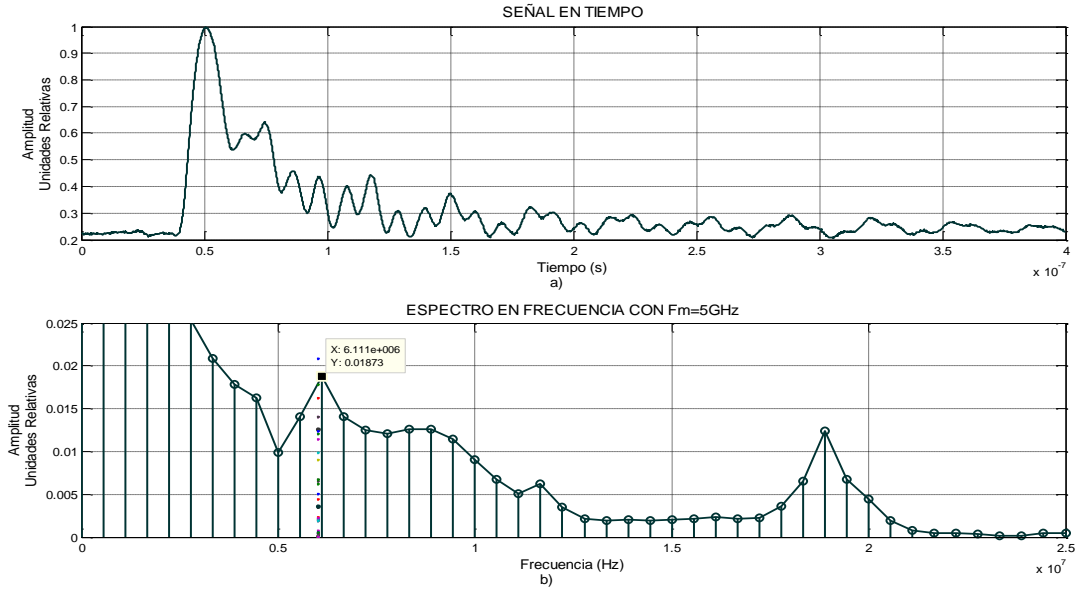


Figura 5.4. Señal detectada después de aislar el camino óptico entre Sdet y la lente. a) Respuesta en tiempo, b) Espectro en frecuencia.

En este resultado se encontró de nuevo la componente principal de frecuencia de 6.11MHz. Aún así, procurando que la señal que recibiera el fotodetector estuviera bien centrada y con la mitad del área de detección cubierta. Se buscó la mejor respuesta procurando la incidencia de la mitad del rayo reflejado sobre la lente del fotodetector obteniendo la señal mostrada en la Figura 5.5.

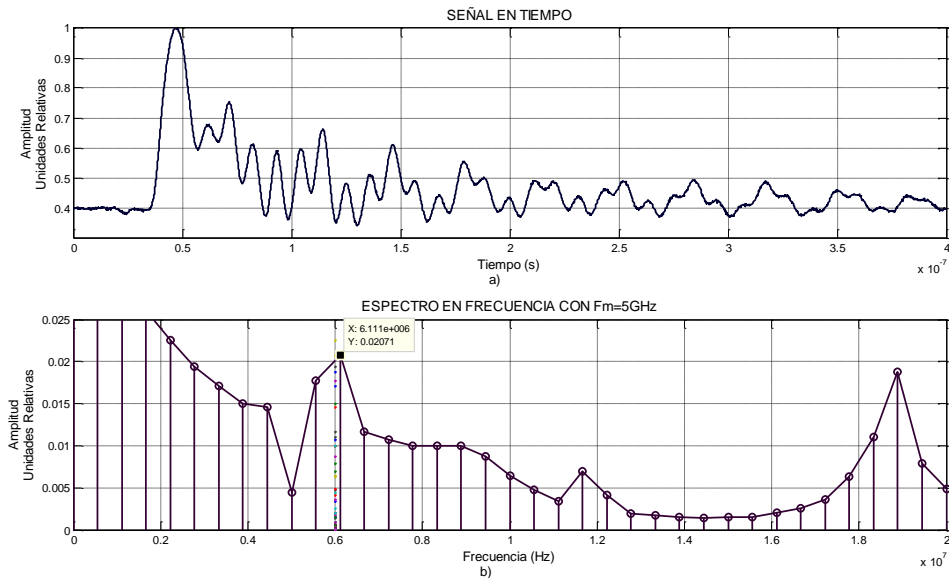


Figura 5.5 Mejor señal obtenida con el transductor fotoacústico de alta frecuencia y no contacto. a) Respuesta en tiempo, b) Espectro en frecuencia.

Esta señal varía únicamente por la amplitud de las componentes en frecuencia. El resto de sus características se conservan en ambas mediciones siendo su detección de 6.11MHz.

Para evitar que el pulso de generación se “encime” con la señal de detección, se pensó en que una posible solución sería ocupar un láser continuo de mayor potencia óptica, de esta manera sería posible eliminar la lente utilizada para concentrar el rayo de reflexión, ya que esta lente es la que concentra también la dispersión del láser pulsado. Esto se realizó en una última prueba empleando un láser de detección de 735nm a 35mW, con lo cual efectivamente pudimos eliminar la lente además de tener también la ventaja de mejor respuesta del fotodetector, ya que a esta longitud de onda su respuesta relativa es 27% mayor a la que ofrece con el antiguo láser de 633nm. La reflexión con respecto del aluminio es un poco menor pero la diferencia es prácticamente despreciable. El resultado obtenido se muestra en la Figura 5.6.

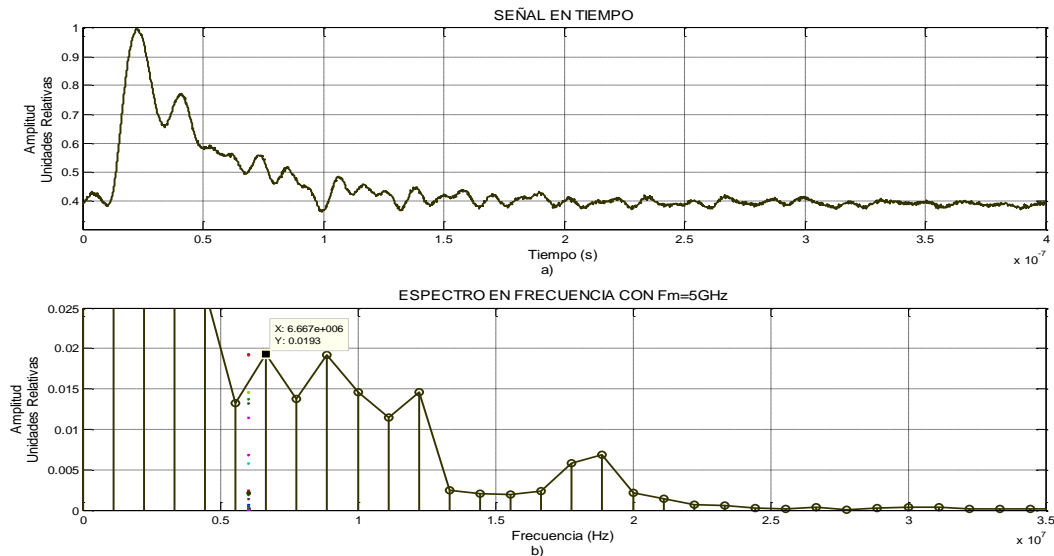


Figura 5.6 Señal obtenida con láser continuo de detección de 735nm y 35mW, evita el uso de la lente. a) Respuesta en tiempo, b) Espectro en frecuencia.

Se puede observar que la señal obtenida en tiempo es similar a la de la Figura 5.4, solo que en la Figura 5.6 aparecen más componentes de frecuencia, estas componentes pueden ser debidas a que se estén detectando otros modos de vibración del vidrio además de las ondas superficiales, ya que el método de fotoacústico permite excitar prácticamente todo tipo de ondas en el material, solo que por el patrón impreso en la superficie, se da preferencia a generar y por lo tanto detectar ondas superficiales.

La señal medida de nuevo tuvo su principal componente en 6.66MHz. Esta prueba se realizó solo en una medición, se desmontó el equipo y posteriormente se analizaron los datos,

consideramos altamente probable que de realizar de nuevo la prueba enfocando mejor el láser al camino óptico de la reflexión, encontraríamos la componente principal en 6.11MHz.

Después de esta prueba se puede concluir que el pulso sobre el cual la señal aparece montada en las figuras anteriores, no es del láser de generación, ya que en esta prueba, dicho haz no interfiere en la medición del fotodiodo debido a que se eliminó la lente que concentraba el rayo de generación.

Con los resultados anteriores se concluye que se puede usar un haz de detección de baja potencia y una lente o un haz de mayor potencia óptica sin lente. En el primer caso, a pesar de que el pulso de incidencia del láser de generación sea también captado por la lente y como consecuencia por el fotodetector, los resultados de las mediciones son muy poco variantes. El segundo caso tiene la ventaja de poder eliminar un elemento óptico, que es la lente.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES

Mediante la técnica fotoacústica es posible generar una onda superficial de frecuencia deseada a través del diseño de un patrón impreso en una muestra de cualquier tipo de material que no debe ser necesariamente conductor o reflejante. El principio de reflexión de la luz es empleado para la detección de esta señal generada. En el presente trabajo se comprobó lo anterior en un sustrato de vidrio, generando 6MHz de frecuencia y detectando dicha señal con un error entre 1.6% y 10%.

6.1 COMPROBACIÓN Y VENTAJAS DEL MÉTODO

La generación así como la detección de una onda ultrasónica sobre la muestra de vidrio a 6MHz son sin contacto, evitando así problemas de acoplamiento; ambos procesos se logran por principios básicos de óptica tales como absorción y reflexión.

El dispositivo propuesto no daña la muestra ni altera sus características físicas, ya que el patrón Sgen y Sdet pueden ser impresos o adheridos a la muestra y su peso es despreciable. El montaje de esta medición es muy sencillo además de tener un bajo costo comparado con otros dispositivos que realizan esta misma tarea, su fabricación fue hecha totalmente en el CCADET con el equipo que ya existía antes de este proyecto. No necesita ningún tipo de operación especializada, únicamente cuidar la incidencia del haz de reflexión sobre el fotodetector; no requiere mayor cantidad de dispositivos electrónicos tales como filtros o amplificadores externos, es suficiente con un osciloscopio de amplio ancho de banda y posteriormente una computadora para realizar el procesamiento de los datos.

Las mediciones se realizan rápidamente una vez que se tiene el dispositivo impreso y el equipo disponible, las alineaciones del montaje tampoco requieren mucho tiempo.

Se puede utilizar el dispositivo Sgen para generar y un método distinto para detectar, como se comprobó al utilizar la película PVDF dando por resultado una señal de 6.1MHz. O en

caso contrario, generar el ultrasonido por otros métodos y emplear el Sdet para detectar la señal, definiendo esto según la aplicación.

Se ha generado un programa que ayuda a definir correctamente las características de los dispositivos a usar, de acuerdo a la señal deseada se puede obtener el perfil temporal y de intensidad del haz láser de generación adecuado, número de líneas del Sgen y Sdet de acuerdo al ancho de banda de la señal deseada; además este programa proporciona un pronóstico de la respuesta del transductor.

No es necesario realizar estas mediciones en ambiente de laboratorio, además que las formas de los materiales a medir son irrelevantes y se puede medir a altas temperaturas del material sin tener daño en el patrón impreso, ya que el punto de fusión de los metales posibles a usar (materiales mostrados en la Tabla 1) está arriba de 1100°C.

6.2 FACTORES CRÍTICOS DEL DISPOSITIVO

Como se mencionó en el capítulo 4, los factores a cuidar en el diseño del transductor son los siguientes:

- Se debe conocer exactamente la velocidad de propagación de onda en el material a emplear así como la frecuencia a la que se desea trabajar.
- Es necesario definir correctamente, de acuerdo al tipo de muestra, los materiales a depositar para el Sgen y Sdet. El patrón Sdet debe ser absorbente por al menos 4% más que la muestra en la longitud de onda del láser pulsado. El patrón Sdet debe ser altamente reflejante a la longitud de onda de láser continuo a emplear.
- Para realizar un diseño, es importante asegurarse de generar sin problemas y con las dimensiones necesarias la mascarilla perforada del patrón requerido.
- La altura del depósito en la detección debe ser menor a la longitud de onda del láser continuo a usar.
- Asegurarse que el fotodetector responde a la longitud de onda del láser empleado.
- Conocer el número de muestras que toma el osciloscopio, así como la frecuencia de muestreo,
- Si existen dispositivos eléctricos que puedan generar ruido de alta frecuencia cerca de donde se realizará la medición, blindar el cable del fotodetector para evitar este factor.

- Emplear láseres con la potencia óptica adecuada, tanto para la detección de rayo reflejado hacia el fotodiodo, como para generar una onda acústica superficial de amplitud suficiente para ser detectada pero sin llegar al régimen de ablación del sustrato a estudiar.

6.3 LIMITANTES ENCONTRADAS EN EL DESARROLLO DEL TRANSDUCTOR

Una de las principales limitantes está en la obtención de la placa perforada con el diseño del Sgen y Sdet. Las dimensiones de ellos dependerán de la velocidad de propagación de onda dentro del material, así como de la frecuencia de trabajo. La frecuencia, como se mencionó en el capítulo 1, debe ser alta para poder detectar fallas del orden de micras de ancho.

En el caso del latón, se pudieron generar perforaciones uniformes del orden de centenas de micras, pero por el método empleado, no es posible tener un patrón del orden de decenas de micra, esto limita mucho el espectro de frecuencias que se pueden estudiar.

La comprobación del método propuesto se pudo llevar a cabo, aunque la señales detectadas no fueron de la forma esperada en el dominio del tiempo, su Transformada de Fourier muestra la principal componente muy cerca de la frecuencia generada, con un error de 1% y 10%.

6.4 ELECCIÓN DE LONGITUD DE ONDA DE LOS LÁSERES A EMPLEAR

Es importante tener cuidado con la correcta elección de los láseres a emplear, verificando ventajas y desventajas de acuerdo a los recursos con los que se cuente. En el caso de la longitud de onda del láser de generación, a mayor diferencia de absorciones, entre el material depositado y la muestra a medir, se mejora por mucho la relación señal a ruido. La desventaja es que los metales absorben mejor si la luz es ultravioleta, la cual, de emplearse, debe ser con mucho cuidado y tomando todas las precauciones ya que por la capacidad de penetración de estas radiaciones, existen efectos nocivos manifestados por la piel y los ojos.

De igual manera con el láser de detección; la reflexión puede ser mejor si el rayo es infrarrojo; sin embargo, se deben asegurar el correcto enfoque hacia la mascarilla del Sdet así como el enfoque del rayo reflejado al fotodetector.

En general, con el método Fotoacústico, generamos vibraciones en todas direcciones del material; sin embargo, el método aquí empleado da preferencia a la onda superficial debido al diseño. Si el láser empleado es infrarrojo, penetra más en el material y la señal detectada, efectivamente puede tener mayor cantidad de componentes frecuenciales como ocurrió en la señal detectada de la Figura 5.6.

6.5 TRABAJO FUTURO

Indagar sobre un método con el cual se puedan realizar placas perforadas del orden de decenas de micras, ampliando así la respuesta en frecuencia del transductor.

El laboratorio de Fotofísica del CCADET ha adquirido varios metales para ser depositados en sustratos adecuados para lograr una mayor diferencia de absorciones y la mejor reflexión; también cuenta con un láser Nd:YAG que proporciona las longitudes de onda analizadas para cada material en la Tabla 2. De esta manera se tienen grandes posibilidades de analizar casi cualquier material.

MATERIAL	ABSORCIÓN A				
	248nm	266nm	355nm	532nm	1064nm
Aluminio	0.074	0.075	0.076	0.08	0.013
Cobre	0.64	0.65	0.57	0.3	0.018
Oro	0.66	0.65	0.63	0.25	0.016
Hierro	0.52	0.5	0.42	0.38	0.03
Molibdeno	0.31	0.33	0.45	0.43	0.016
Níquel	0.56	0.57	0.57	0.4	0.02
Platino	0.61	0.6	0.47	0.36	0.028
Plata	0.74	0.76	0.33	0.057	0.019
Tungsteno	0.5	0.53	0.52	0.5	0.019

Tabla 2. Absorción de algunos metales a ciertas longitudes de onda del láser YAG.

Realizar mediciones con sustratos del mismo material y con el mismo diseño, en buen estado y con fracturas, verificando de esta manera si el dispositivo responde como se espera en caso de que el sustrato no esté en buenas condiciones.

APÉNDICE A.

PROCEDIMIENTO DETALLADO PARA OBTENER LA MASCARILLA IMPRESA SOBRE EL VIDRIO

1. Realizar el dibujo con dimensiones reales de las líneas del Sgen y Sdet en el programa AUTOCAD como se muestra en la Figura a.

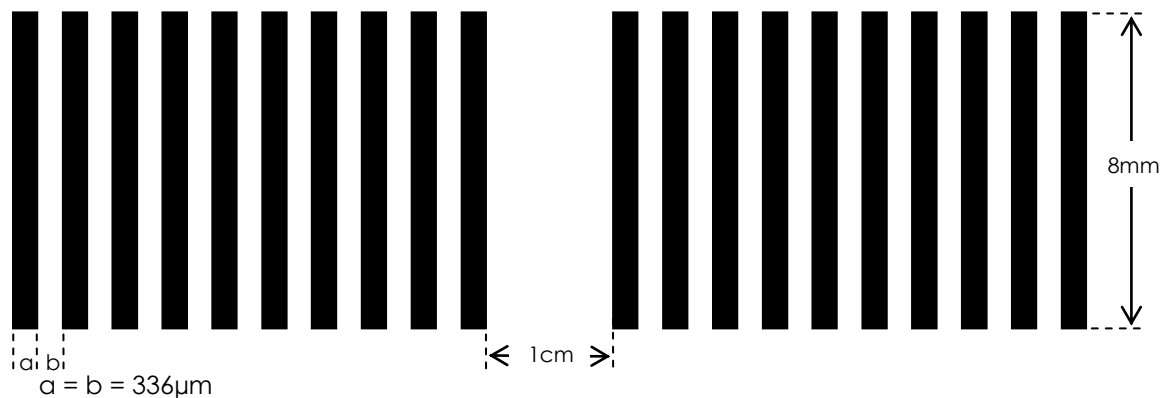


Figura a. Dibujo de la mascarilla con dimensiones.

2. Imprimir el dibujo sobre vidrio, éste se usará para imprimir el patrón sobre el material a perforar, latón en este caso. Para realizar este proceso, una máquina de fotolitografía, imprimió el patrón con un haz láser sobre una placa de vidrio sensibilizada, que posteriormente es revelada.

3. Imprimir el patrón por fotolitografía en una placa de latón. Para esto:

- a) Cortar placas de latón con espesor de 0.36mm, en cuadrados de 26.6mm por lado.
- b) Usando guantes, limpiar cada placa con acetona, posteriormente alcohol, enjuagar con agua desionizada y por último realizar un lavado ultrasónico durante 5 minutos.
- c) Colocar las placas en un spin coating sujetadas correctamente, en este caso se emplea una bomba de vacío para generarlo entre el latón y el disco giratorio del spin coating.
- d) Colocar una gota de resina positiva sobre el centro del cuadro de latón y poner a girar el spring coating a 800 revoluciones x minuto durante 10 segundos.

e) Calentar la placa de latón por un periodo de 10 minutos a 90°C.

Los pasos anteriores están ilustrados en la siguiente figura.

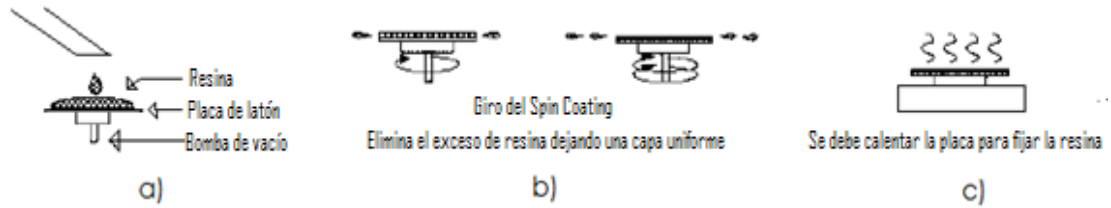


Figura b. Proceso para tener la placa de latón con una capa de resina.

f) Colocar la placa de latón entre dos vidrios, colocando el que tiene el patrón impreso sobre el lado que tiene resina y sujetar con imanes como se muestra en la Figura c.

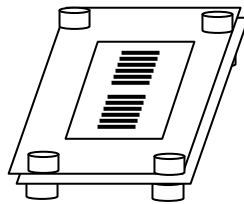


Figura c. Sandwich realizado entre dos vidrios y con la placa de latón en el centro.

g) Exponer a luz UV por un periodo de 12 segundos.

h) Colocar la placa de latón en una solución de NaOH a 1% de concentración por un tiempo aproximado de 5 segundos. Con este proceso se logró tener el patrón impreso sobre el latón.

i) Calentar de nuevo la placa a 90°C durante 10 minutos.

4. Perforar la placa de latón colocando la placa en un recipiente con FeCl_3 al 20% de concentración y 50°C en un tiempo aproximado de 1 hora.

Estos procesos se ilustran en la Figura d.

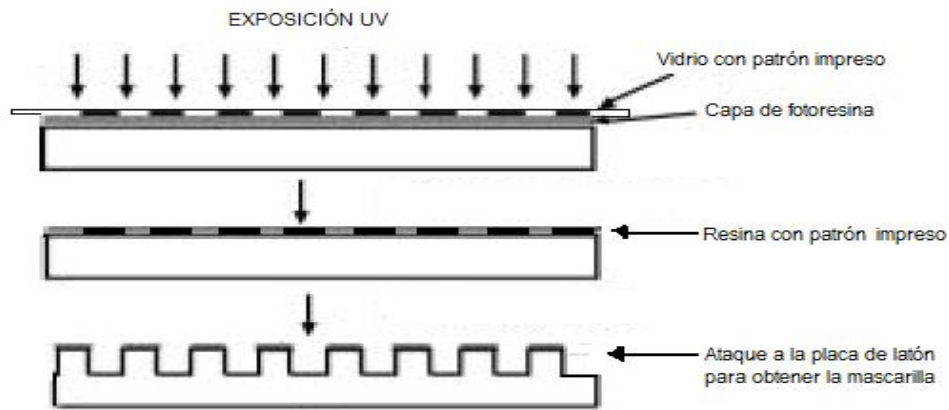


Figura d. Impresión del patrón sobre la placa de latón y ataque.

La Figura e muestra el proceso en síntesis paso a paso para obtener esta mascarilla perforada.

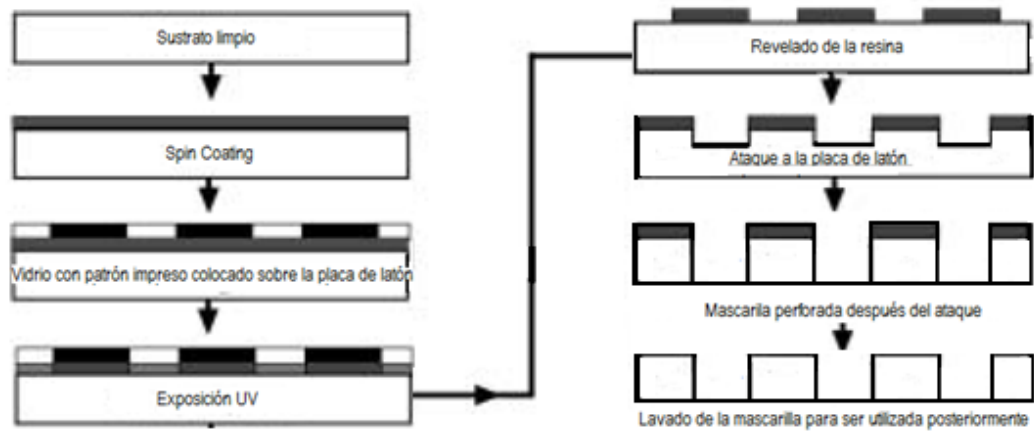


Figura e. Pasos para obtener la mascarilla perforada.

5. Depositar el patrón sobre el vidrio.

a) Utilizando estas mascarillas, se depositaron películas de Aluminio sobre el vidrio con un sputtering marca LEIKA modelo EM MED020, utilizando una corriente de 8.5 mA, un Voltaje de 4440 V, y una presión de 1.6×10^{-2} MVar, durante 45 minutos.

APÉNDICE B.

ESPECTRO DE ABSORCIÓN Y REFLEXIÓN DE ALGUNOS METALES.

A continuación se presentan los espectros de algunos metales, estos espectros se obtuvieron de [34].

35.42 OPTICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF MATERIALS

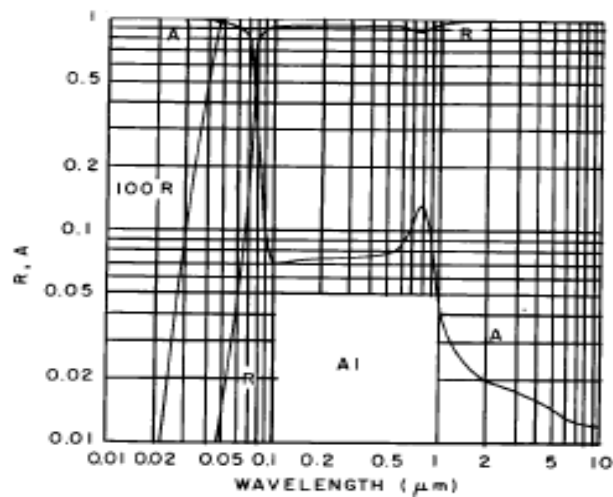


FIGURE 16 Reflectance and absorptance for aluminum vs. wavelength calculated for normal incidence.²⁹ (With permission.)

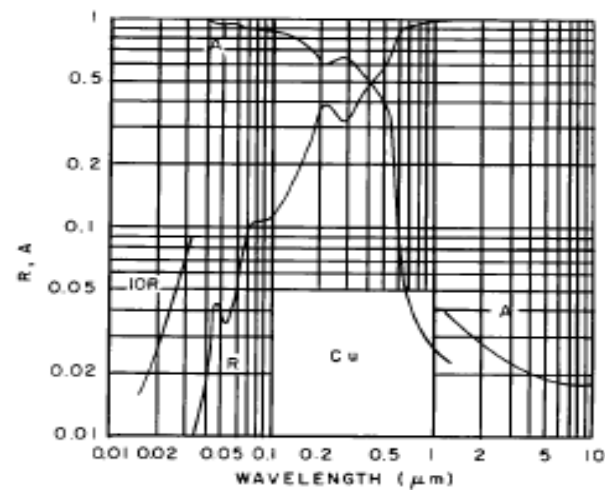


FIGURE 17 Reflectance and absorptance for copper vs. wavelength calculated for normal incidence.²⁹ (With permission.)

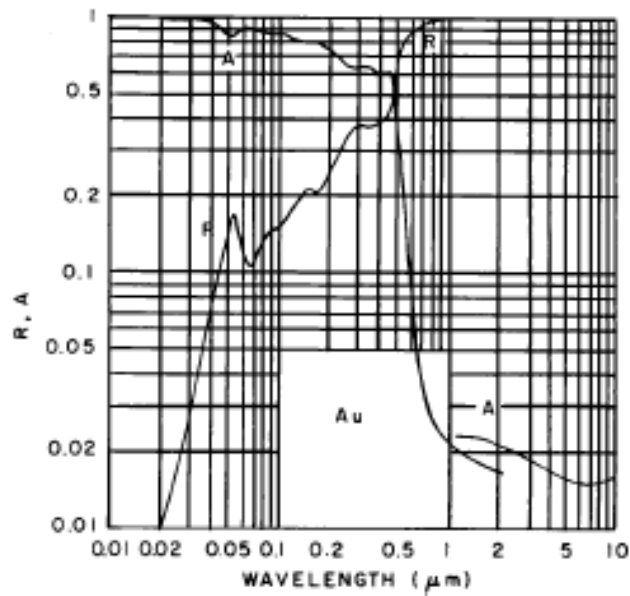


FIGURE 18 Reflectance and absorbance for gold vs. wavelength calculated for normal incidence.³³ (With permission.)

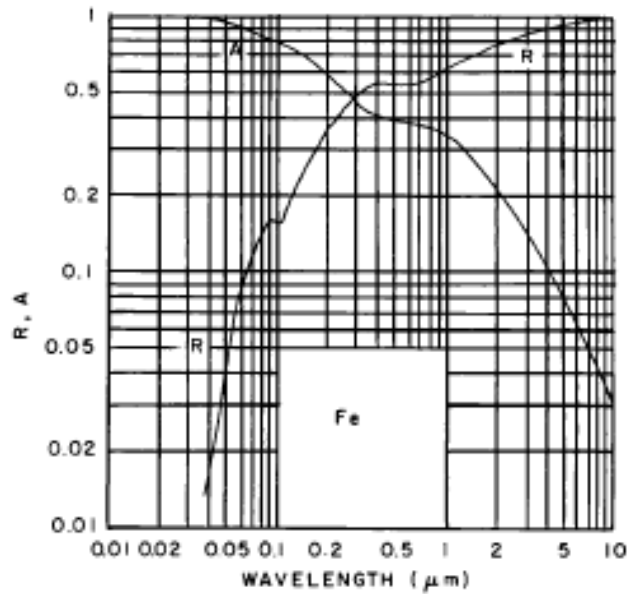


FIGURE 19 Reflectance and absorbance for iron vs. wavelength calculated for normal incidence.³³ (With permission.)

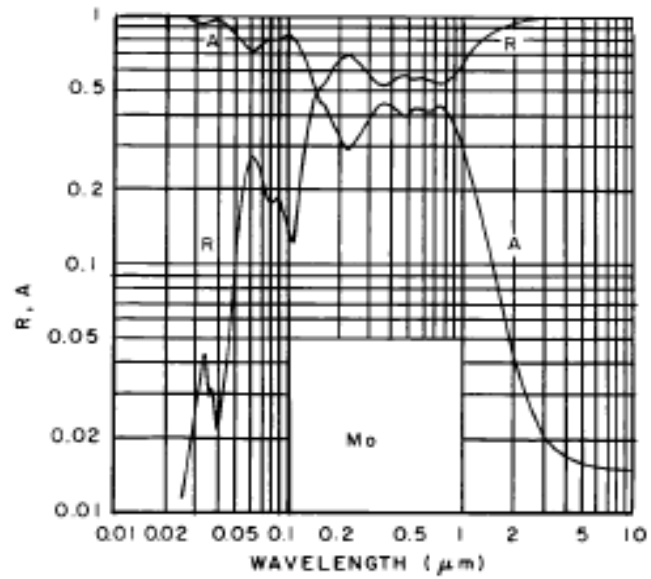


FIGURE 20 Reflectance and absorbance for molybdenum vs. wavelength calculated for normal incidence.²⁹ (With permission.)

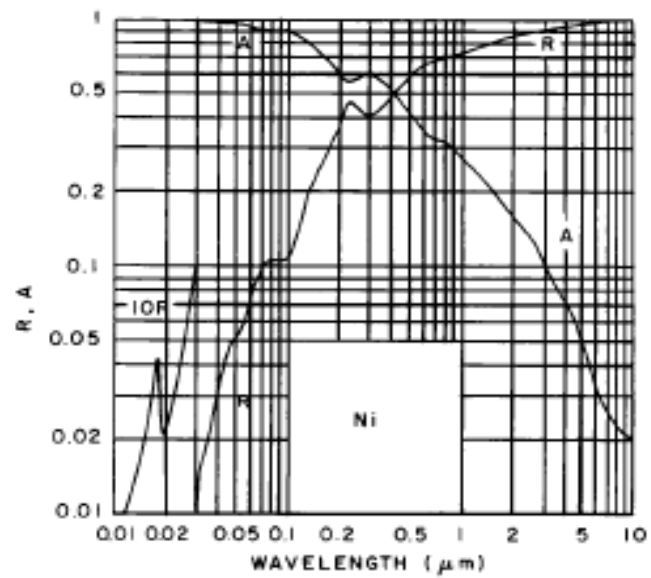


FIGURE 21 Reflectance and absorbance for nickel vs. wavelength calculated for normal incidence.²⁹ (With permission.)

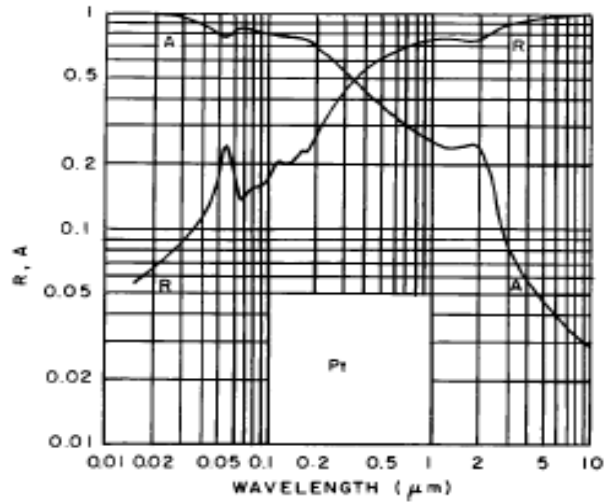


FIGURE 22 Reflectance and absorptance for platinum vs. wavelength calculated for normal incidence.²⁹ (With permission.)

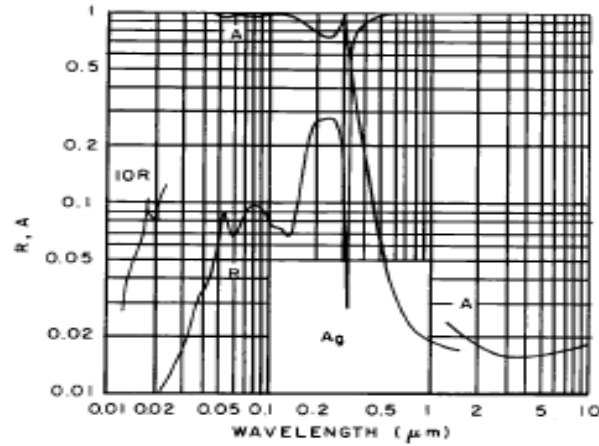


FIGURE 25 Reflectance and absorptance for silver vs. wavelength calculated for normal incidence.²⁹ (With permission.)

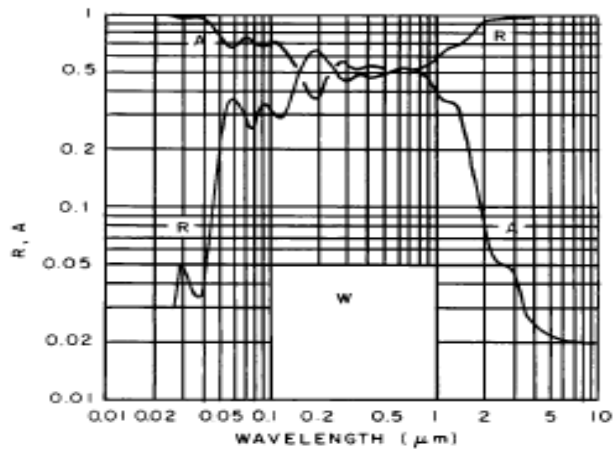


FIGURE 26 Reflectance and absorptance for tungsten vs. wavelength calculated for normal incidence.²⁹ (With permission.)

APÉNDICE C.

PROGRAMAS DE SIMULACIÓN

Se presentan el código de los programas elaborados en MATLAB para simulación y procesamiento de datos.

A) PROGRAMAS DE SIMULACIÓN DE LA SEÑAL GENERADA

Programa principal:

```
clear all

fg=6e6;           %Frecuencia de excitación al sistema
v=4032;          %Velocidad de onda dentro del material
Ng=10;           %numero de lineas del TOB

LOL=15e-9;       %Duración del pulso del láser de generación

Fm=fg*199;       %frecuencia de muestreo
tg=inv(fg);      %tiempo de duración del pulso laser
wg=v*tg
d=wg/2           %Ancho de lineas
Tdo=Ng*tg;

% La siguiente función representa los pulsos del laser
K=0.01;
[fun1,x]=top_hat (Fm,Ng,tg,K);

% Perfil de intensidad del laser
[fun]=gauss (Fm,x,Tdo);

% Convolución de los primeros dos
Mult1=fun1.*fun;
figure (1)
hold on
[data,f]=TFurier (Fm,Mult1);
data1=data./max(data);
plot (f,data1,'-r*'); %La grafica roja es la peineta de dirac, en el
                      texto como M1(f)

axis([0 300e6 0 1.05]) %El axis es importante porque de lo contrario
                      las graficas son muy extensas
title ('Frequency Response')
xlabel ('Hz')
grid

% Perfil del TOB
```

```

x=0:inv(Fm):(Tdo)-inv(Fm);
fun2=heaviside((tg/2)-x);
[data2,f]=TFurier (Fm,fun2);
data3=data2./max(data2);
plot (f,data3,'-co') %La grafica cyan viene en el texto como Lg(f)

% Convolución del Perfil TOB con la peineta de dirac
Mult2=data.*data2;

% Perfil del láser a usar
[fun3,data4]=gauss (Fm,x,LOL);
data5=data4./max(data4);
plot (f,data5,'-b') %La grafica azul esta en el texto como Ptl(f)

% Convolución del laser con el perfil TOB
Mult3=Mult2.*data4;
G=Mult3./max(Mult3);
plot (f,G)
hold off

```

Funciones que emplea en el programa principal:

```

function [fun1,x]=top_hat (Fm,Ng,tg,K)

Tm=inv(Fm); %tiempo de muestreo
Vp=1; %voltaje pico pico
Tdo=Ng*tg;
x=0:Tm:Tdo-Tm;
fun1=(Vp/2)*square(2*pi*inv(tg)*x,K)+(Vp/2);

```

```

function [fun,data]=gauss (Fm,x,Tdo)

fun=exp(-0.5*(x./Tdo).^2);
[data,f]=TFurier (Fm,fun);

```

```

function [data,f]=TFurier (Fm,fun)

TF = fft(fun);
Pyy = abs(TF) / length(TF);
f = Fm*(0:round(length(TF)/2))/length(TF);
data=Pyy(1:round(length(TF)/2)+1);

```

B) PROGRAMA DE SIMULACIÓN DE LA SEÑAL DETECTADA

```

clear all
lamnda=633e-9; %Longitud de onda del láser de detección
AIlG=60; %Angulo de incidencia del láser en grados
A1=1e-10; %Amplitud de la onda ultrasónica

```

```

c=4032;           %Velocidad de onda
d=336e-6;        %Ancho de cada escalon
x1=10e-6;        %Espacio
t1=3e-9;         %tiempo
na=130e-9;       %valor de h, lambda/na.

F=1.7e4;         %Frecuencia menor a la de detección
LOAS=2*d;        %Longitud de onda de la OAS
K1=2*pi/LOAS;    %Vector de onda de OAS
AILR=pi*AILG/180; %Equivalente en radianes de AILG

%Contribución del orden de difracción
s2=exp(i*AILR);

%Onda ultrasonica viajando en la superficie de la muestra
x=(0:2000)*x1;   %vector de espacio
t=(0:2000)*t1;   %vector de tiempo
k=2*pi/lamnda;   %Vector de onda Optico=2(pi)/lamda
u=exp(i*cos(K1*x-t*c*F)*A1);

%Contribución de la rejilla
n=na/(length(u)-1); %Para tener el vector s1 del mismo tamaño que s3
h=0:n:na;          %Altura de la rejilla
s1=(1+exp(i*k*h))/2;

%Señal del fototodector
S1=s1.*u.*s2;
hold on
subplot(2,1,1)
plot(t,real(S1))
xlabel('Tiempo (s)')
title('Señal detectada')
grid

[data,f]=TFurier(inv(t1),S1);
subplot(2,1,2)
plot(f,data)
xlabel('Frecuencia (Hz)')
title('Respuesta en frecuencia')
grid

```

C) PROGRAMAS PARA EL PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Programa principal:

```

%Programa para convertir archivos con extension *.wfm
%generados por los osciloscopios tektronix
% solo hay poner el nombre del archivo sin extension
% el programa corre el programa cnvrtwfm mediante una
% salida a DOS. Utiliza la funcion conv_carac
% Santiago J. Perez R. para fotofisica
clear
n=input('Dame el numero de los archivos a leer ');
if n>999,

```

```

    disp('Error el numero de archivos debe ser menor a 999');
    break;
end

for i=1:n,
    nombre=conv_carac(i-1);
    nom_arch=[nombre];
    y(:,i)=con_wfm_mat_ver2(nom_arch);% señal fotofisica
end
% para calcular eje de tiempo
[N,ts,t_1,trig]=lee_t_wfm(nom_arch);
%IMPORTANTE: Número de datos del eje de tiempo dados por el osciloscopio
t=(0:10000-1)*ts;

```

Funciones que emplea el programa principal:

```

function nom_arch=conv_carac(n);
% funcion para convertir un numero en caracter
% pero con ceros adelante y convertirlo en nombre
% de un archivo en formato WFM (tektronix)
if n>999;
    disp('Error debe ser un numero menor a 999')
    return
end
p=1000000;
s1=num2str(p+n);
L=length(s1);
s=s1(2:L);
nom_arch=['tek',s];

function [N, ts, t_i, Trig] = lee_t_wfm(nom_arch)
%funcion para leer:
% numero de muestras
% el tiempo de muestreo,
% posicion del disparo, y
% tiempo inicial.
%de un archivo con formato WFM,
%obtenido con osciloscopios Tektronix
%modelo .....
%
% Antonio Tavares Mancillas
% 01.06.2005

nom_arch2=[nom_arch, '.wfm'];
programa='converttekwmf '; % nombre del programa de conversion
nom_arch_sal=[nom_arch, '.txt'];
opcion=' /TXT ';
instruccion=[programa nom_arch2 opcion nom_arch_sal];
dos(instruccion);

fid=fopen(nom_arch_sal, 'r');
pt=fread(fid,365, 'char');
sall=setstr(pt);
fclose(fid);

```



```

%Toma de valores.
target1="Sample Interval";
L1=length(target1);
u1=findstr(sall,target1);
ts=str2double(sall(u1+L1:u1+L1+16));
target2="Points";
L2=length(target2);
u2=findstr(sall,target2);
t_i=str2double(sall(u2+L2:u2+L2+17));
target3="Trigger Point";
L3=length(target3);
u3=findstr(sall,target3);
Trig=str2double(sall(u3+L3:u3+L3+5));
target4="Record Length";
L4=length(target4);
u4=findstr(sall,target4);
N=str2double(sall(u4+L4:u4+L4+6));

%Cierre del archivo.
instru=['delete ',nom_arch_sal];
eval(instru);           % borra el archivo txt

function y = con_wfm_mat(nom_arch)
%funcion para convertir un archivo
%con formato WFM, obtenido con osciloscopios Tektronix
%modelo .....a archivo con formato mat (MATLAB)
% lo guarda con el mismo nombre pero diferente extension
% SJPR para Fotofisica
% ver julio 2005

nom_arch2=[nom_arch, '.wfm'];
programa='converttekwmf '; % nombre del programa de conversion
nom_arch_sal=[nom_arch, '.dat'];
opcion=' /MLAB ';
instruccion=[programa nom_arch2 opcion nom_arch_sal];
dos(instruccion);
y=load(nom_arch_sal);
instru=['delete ',nom_arch_sal];
eval(instru);           % borra el archivo dat

```

Una vez que se corre este programa, se obtienen las gráficas en tiempo y frecuencia mediante el siguiente programa:

```

Fm=5e9;           %Frecuencia de muestreo del osciloscopio
figure (1)       %Se cambia el número entre paréntesis de acuerdo a la
                 %señal procesada, ocurre de igual manera en la siguiente
                 %instrucción
y1 =y(:,1);      %Cambiar el número de acuerdo a la grafica procesada
subplot (2,1,1)
plot (t,y1)
title ('SEÑAL EN TIEMPO');
ylabel ('Amplitud');

```

```
xlabel ('Tiempo (s)');

TF = fft(y1(:,1),4500);
Pyy = abs(TF) / length(TF);
f = Fm*(0:round(length(TF)/2))/length(TF);
data=Pyy(1:round(length(TF)/2)+1);

subplot (2,1,2)
hold on
stem (f,data);
plot (f,data);
title ('ESPECTRO EN FRECUENCIA CON Fm=5GHz');
xlabel ('Frecuencia (Hz)');
hold off
```

III. REFERENCIAS

- [1] S. Boonsang, R.J. Dewhurst, "A sensitive electromagnetic acoustic transducer for picometer-scale ultrasonic displacement measurements". *Sensors and Actuators* Vol.127, pp. 345-354. 2006.
- [2] Messineo María, Elicabe Guillermo, Frontini Gloria, "Análisis inverso de señales de ultrasonidos para determinar constantes elásticas". *Mecánica Computacional* Vol XXVII. Noviembre 2008, Argentina.
- [3] Castillo Mixcóatl Juan, "Optimización de un fotodetector adaptivo de GaAs basado en el efecto foto-FEM, para aplicaciones de detección de ultrasonido". TESIS INAOE 2003.
- [4] Robert E. Green Jr., "Non-contact ultrasonic techniques". ELSEVIER, *Ultrasonics* 42, 2004.
- [5] Lanza di Scalea F., Berndt T.P., Spicer J.BI, Djordjevic B.B. "Remote láser generation of narrow-band surface waves through optical fibers". *Transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control*, Vol. 46, pp. 1551-1556. No. 6, 1999
- [6] Collison I. J., Stratoudaki T. Clark M., Somekh M.G. "Measurement of elastic nonlinearity using remote láser ultrasonics and Cheap Optical Transducers and dual frequency surface acoustic waves". Elsevier *Ultrasonics*. Vol. 48, pp. 471-477. 2008.
- [7] D. A. Hutchins, D. E. Wilkins, "Elastic waveforms using láser generation and electromagnetic acoustic transducer detection". *Journal of Applied Physics* 58, 1985.
- [8] Andrew C. Tam, "Applications of photoacoustic sensing techniques". IBM Almaden Research Center, California.
- [9] Huang J, Krishaswamy S., Achenbach J. D. "Láser generation of narrow-band surfaces waves" *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 94(5) pp. 2527- 2531. 1992.
- [10] Stratoudaki T., Hernandez J.A., Clark M., Somekh M.G. "Cheap optical transducers (CHOTs) for narrowband ultrasonic applications" *Meas. Sci. Technol.* Vol. 18, pp.843-851. 2007.

- [11] Hutchins David, Wright William, Hayward Gordon. "Air-Coupled Piezoelectric Detection of Láser-Generated Ultrasound". IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control. Vol. 41. No. 6. pp. 796 – 805. November 1994.
- [12] Toda Minoru. "Phase-Matched Air Ultrasonic Transducers Using Corrugated PVDF Film with Half Wavelength Depth". IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control. Vol. 48. No. 6. pp. 1568 – 1574. November 2001.
- [13] McIntoch J.S., Hutchins D.A., Billson D.R., Robertson T.J., Noble R.A., Jones A.D.R. "The characterization of capacitive micromachined ultrasonic transducers in air". Ultrasonics Elsevier 40 2002 pp. 477-483.
- [14] R. Boll, K. J. Overshott. "Sensors. A comprehensive survey". Vol. 5. Magnetic Sensors. VCH.
- [15] Frieder Lucklum, Bernhard Jakoby, "Electromagnetically excited resonator sensors for remote mass detection and liquid phase sensing". International Congress on Ultrasonics, Vienna. 2007.
- [16] Gatzen Hans, Adreeva Ekaterina, Heri Iswahjudi. "Eddy-Current Microsensor Base don Thin-Film Technology". IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 38, No. 5. pp 3368 – 3370. September 2002.
- [17] Yamada S., Katou M., Iwahara, Dawson F. "Eddy Current Testing Probe Composed of Planar Coils". IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 31, No. 6, pp. 3185 – 3187. November 1995.
- [18] Mukhopadhyay Subhas, Yamada Sotoshi, Iwahara Masayoshi. "Experimental Determination of Optimum Coil Pitch for a Planar Mesh-Type Micromagnetic Sensor". IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 38, No. 5, pp. 3380 – 3383. September 2002.
- [19] Monchalin JP. "Optical Detection of Ultrasound" IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectric Freq. Control. Vol. 33 pp. 485-499. 1986.
- [20] R. J. Dewhurst, Q Shan, "Optical remote measurement of ultrasound" IOP Publishing Ltd 1999.

- [21] C.K.N. Patel, y A.C. Tam. "Pulsed Optoacoustic spectroscopy of condensed matter", Rev. Mod. Phys. 53, 517-550, (1981).
- [22] Collison I. J., Stratoudaki T. Clark M., Somekh M.G. "Measurement of elastic nonlinearity using remote laser ultrasonics and Cheap Optical Transducers and dual frequency surface acoustic waves". Elsevier Ultrasonics. Vol. 48, pp. 471-477. 2008.
- [23] Pedraza Morales, Rodríguez Zurita. "Propiedades de difracción en campo lejano de rejillas intercaladas de Ronchi". Revista Mexicana de Física No. 47. Pp. 252-259. Junio 2001.
- [24] Arroyo Carrasco Maximino Luis, "Medición del grado de coherencia óptica mediante fotodetectores adaptivos basados en el efecto de fuerza foto-electromotriz". TESIS INAOE México 2001.
- [25] E. Marín, "Escuchando la luz: Breve historia y aplicaciones del efecto fotoacústico". Journal of Physics Education. Vol 2, No. 2, Mayo 2008 México.
- [26] D. A. Hutchins, D. E. Wilkins, "Elastic waveforms using laser generation and electromagnetic acoustic transducer detection". Journal of Applied Physics 58, 1985
- [27] Saavedra Renato, Cruz-Orea Alfredo, "Imágenes de onda térmica para la visualización de rasgos subsuperficiales". Universidad de Concepción, Chile y CINVESTAV México.
- [28] Abdelarrague Serrano Ricardo. "Implementación de un sistema fototérmico al vacío para la medición de propiedades térmicas en materiales en un rango de temperatura de 20 a 1000°C". IPN, CICATA México 2008. TESIS.
- [29] C. B. Scruby and L. E. Drain, "Laser Ultrasonics Techniques Applications". Hilguer. Bristol. 1990.
- [30] R. N. Thurston, Allan D. Pierce. "Ultrasonic instruments and devices II". Physical acoustics: principles and methods. Vol. XXIV.
- [31] Rossing Thomas D. (Ed.) "Handbook of Acoustics". Springer. 2007.
- [32] Kinsler Lawrence, Frey Austin, Coppens Alan, Sanders James. "Fundamentos de Acústica". Edit. Limusa. 2006.

- [33] Pérez Ruiz S.J., Alcántara Iniesta S., Hernández P.R., Castañeda Guzmán R. "Sound speed resolved by photoacoustic technique". Revista Mexicana de Física No. 53, pp. 213 – 217. Junio 2007.
- [34] Michael Bass, Eric W Van Stryland, David R. Williams y William L. Wolfe. "Handbook of optics, devices, measurements, & properties". Second editions, Volume II.
- [35] Weber Marvin J., Ph. D., "Handbook of Optical Materials". CRC Press. 2003.
- [36] A. M. Aindow, R. J. Dewhurst, S. B. Palmer, "Laser generation of directional surface acoustic wave pulses in metals". Opt. Commun, Vol. 42, pp. 116-120, Jun. 1982.
- [37] Data sheet for the Motorola MRD500 photodiode.
- [38] Piezo Film Sensors Technical Manual. Measurement Specialties.
- [39] Putman Constant, De Grooth Bart G., Van Hulst Niek F., Greve Jan. "A detailed analysis of the optical beam deflection technique for use in atomic force microscopy". J. Appl. Phys. No. 72 pp. 6-12. July 1992.